VISIT…

В.А.Григорян
И.Ф.Кобылкин
В.М.Маринин
Е.Н.Чистяков

Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования

В.А. Григорян, И.Ф. Кобылкин,
В.М. Маринин, Е.Н. Чистяков

МАТЕРИАЛЫ И ЗАЩИТНЫЕ СТРУКТУРЫ для локального и индивидуального бронирования

Под редакцией В.А. Григоряна

Москва
РадиоСофт
2008

УДК 623.445
ББК 68.512
М34

Рецензенты:
д-р техн. наук, проф. В.Н. Наумов,
д-р техн. наук, проф. В.В. Селиванов

М34 **Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования** / В.А. Григорян, И.Ф. Кобылкин, В.М. Маринин, Е.Н. Чистяков. Под ред. В.А. Григоряна. – М.: Изд. РадиоСофт, 2008. – 406 с.: ил. 123

ISBN 978-5-93274-013-2

В книге в систематизированном виде излагается комплекс вопросов, связанных с баллистической стойкостью материалов и защитных структур, предназначенных для индивидуальной и локальной бронезащиты от воздействия высокоскоростных пуль и осколков. Представлены физические и математические модели процессов высокоскоростного взаимодействия пуль и осколков с различными типами бронепреград. Изложены современные представления о механизмах заброневого действия баллистического удара пуль, описаны основные методы баллистических испытаний, сформулированы основные принципы проектирования бронежилетов.

Книга предназначена для научных работников, инженеров и военных специалистов, занимающихся разработкой и испытанием средств индивидуальной и локальной бронезащиты. Она также может быть полезна студентам и аспирантам технических университетов и машиностроительных вузов.

УДК 623.445
ББК 68.512

ISBN 978-5-93274-013-2

© Григорян В.А., Кобылкин И.Ф.,
Маринин В.М., Чистяков Е.Н., 2008
© ОАО НИИ стали, 2008
© Оформление, издательство «РадиоСофт»

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 7
Список основных сокращений 11
Глава 1. Основные понятия и определения 13
1.1. Пули стрелкового оружия 13
1.2. Стандарты на средства индивидуальной бронезащиты 15
1.3. Общие сведения об устройстве бронежилетов 37
1.4. Общие сведения об устройстве бронешлемов 41
1.5. Общие сведения об устройстве противопульных щитов 44
Литература 45
Глава 2. Текстильная броня 46
2.1. Материалы текстильной брони 46
2.2. Волокна, нити и ткани. Метрология волокнистых материалов 50
Литература 56
Глава 3. Механизмы взаимодействия пули с текстильной броней 58
3.1. Начальная стадии взаимодействия пули с текстильной броней 59
3.2. Стадии проникания и торможения пули 65
3.2.1. Линейное уравнение движения нити 66
3.2.2. Задача об ударе по нити с постоянной силой натяжения 67
3.2.3. Нелинейная модель движения нити 69
3.2.4. Задача об ударе по нелинейной нити с постоянной скоростью 71
3.2.5. Схема деформирования единичного слоя ткани; проникание пули в бронепакет; эквивалентные нити 73
3.2.6. Критерий выбора оптимальных характеристик тканей 78
3.2.7. Особенности взаимодействия пули с текстильной броней 79
3.3. Энергетический анализ процесса взаимодействия пули с текстильной броней 83
3.4. Методы расчета предельной скорости пробития текстильного бронепакета 86
3.5. Баллистическая энергоемкость текстильных бронепакетов 94
3.6. Влияние влажности текстильного бронепакета на его баллистическую стойкость 97

3.7. Влияние свойств материала подложки на баллистическую стойкость текстильных бронепакетов 102
Литература 105
Глава 4. Полимерная композитная броня 109
4.1. Композиционные материалы 109
4.2. Органопластики 110
4.3. Баллистическая стойкость органопластиков, используемых в СИБ 113
4.4. Влияние кривизны оболочки бронешлема на его баллистическую стойкость 124
Литература 128
Глава 5. Металлическая броня 130
5.1. Стальная броня 130
5.2. Механика процесса пробивания металлического броневлемента 138
5.3. Определение запреградной скорости 147
5.4. Металлическая броня на основе сплавов алюминия и титана 152
Литература 156
Глава 6. Керамическая броня 159
6.1. Керамические бронематериалы 159
6.2. Баллистическая стойкость керамической брони 161
6.3. Поведение керамической брони при ударном воздействии пуль 168
Литература 177
Глава 7. Анализ противопульной стойкости многослойных преград с внешним керамическим слоем 180
7.1. Комбинированная многослойная броня 180
7.2. Инженерная методика расчета противопульной стойкости многослойной защитной структуры с внешним керамическим слоем 184
7.3. Примеры использования инженерной методики для анализа защищающей способности двухслойных и трехслойных защитных структур 192
7.4. Методы повышения живучести многослойных защитных структур с внешним керамическим слоем 201
Литература 202
Глава 8. Прозрачная броня 204
8.1. Прозрачные бронематериалы 204
8.2. Баллистическая стойкость многослойных прозрачных преград 211

Литература 214
Глава 9. Броня из наноматериалов – возможности и перспективы . 215
Литература 219
Глава 10. Забронебое действие высокоскоростного удара пуль при непробитии бронезащиты 221
10.1. Общая характеристика забронебого действия 221
10.2. Особенности забронебого действия 223
10.3. Анализ физических процессов, сопровождающих забронебое действие 226
Литература 239
Глава 11. Баллистические испытания средств индивидуальной бронезащиты 240
11.1. Методы измерения скорости средств поражения 240
11.2. Экспериментальные методы определения показателей действия средств поражения и характеристик защиты 254
11.3. Экспериментальное определение баллистической энергоемкости защитных структур 278
11.4. Требования к установке образцов в процессе динамических испытаний 286
Литература 292
Глава 12. Общие принципы конструирования бронежилетов 295
12.1. Площадь защиты 298
12.2. Дифференцирование защиты 299
12.3. Минимизация количества бронеэлементов 301
12.4. Система терморегуляции 301
12.5. Запреградная травма 304
12.6. Антирикошетный слой 305
12.7. Рациональное распределение массы бронежилета 308
12.8. Защита тканевого пакета от намокания 309
12.9. Рациональная защитная структура 309
12.10. Эксплуатационные параметры 311
Литература 312
Приложение 1. Бронежилеты российских производителей 314
Приложение 2. Шлемы российских производителей 382
Приложение 3. Щиты противопульные и противоударные 393
Приложение 4. Падение скорости пуль по дистанции 398

ПРЕДИСЛОВИЕ

Для индивидуальной и локальной бронезащиты от воздействия высокоскоростных пуль и осколков используется широкий круг защитных противопульных и противоосколочных броневых структур с поверхностной плотностью, не превышающей 50...80 кг/м^2. Очень часто такую броневую защиту называют легкой броней. Легкая броня применяется в средствах индивидуальной бронезащиты – бронежилетах, бронещитах и бронешлемах, для локального бронирования автомобилей, самолетов и вертолетов. Требование минимальности массы защиты приводит к использованию в качестве брони необычных материалов. Так, для защиты от низкоэнергетических средств поражения – револьверных и пистолетных пуль – широко используется текстильная броня из высокомодульных и высокопрочных полиарамидных или полиэтиленовых волокон. Эффективная защита от высокоэнергетических средств поражения с высокой проникающей способностью – бронебойных винтовочных пуль с термоупрочненными сердечниками – невозможна без использования в качестве элемента защитной структуры керамики – высокотвердого, но очень хрупкого материала, что, казалось бы, полностью исключает его применение для защиты от ударно–проникающего действия.

В настоящей книге в систематизированном виде излагается комплекс вопросов, связанных с баллистической стойкостью легкой брони. Подробно рассмотрены основные типы легкой брони: текстильной, органопластиковой, металлической, керамической, комбинированной многослойной и прозрачной. Представлены физические и математические модели процессов высокоскоростного взаимодействия пуль и осколков с различными типами бронеэлементов, приведены количественные зависимости и расчетные методики для оценки их баллистической стойкости. Изложены современные представления о механизмах забронево го действия баллистического удара пуль при непробитии бронезащиты, описаны основные методы их баллистических испытаний, сформулированы основные принципы проектирования бронежилетов.

Для расширения кругозора читателей в книге содержится раздел о возможностях использования наноматериалов для изготовления легкой брони. Многие ведущие научно-исследовательские лаборатории мира имеют весьма обширные планы и хорошо финансируемые программы разработки новых бронематериалов на основе использования достижений нанотехнологий. Но сегодня наноматериалы весьма дороги, хотя интенсивные поиски новых материалов и технологий производства быстро ведут к их удешевлению.

В ближайшее десятилетие можно ожидать появления принципиально новых материалов для баллистической защиты. Несмотря на это комбинированные многослойные преграды с внешним керамическим или металлическим слоями и тогда сохранят свое значение для защиты от бронебойных пуль, обладающих максимальной проникающей способностью в ряду других боеприпасов стрелкового оружия.

Книга написана на основе результатов исследований и разработок, выполненных в Научно-исследовательском институте стали, и лекций по дисциплине «Защита от действия взрыва и баллистического удара», читаемых в МГТУ им. Н.Э. Баумана одним из авторов книги.

Книга состоит из 12 глав и приложений.

В главе 1 рассмотрены характеристики пуль стрелкового оружия, обсуждаются основные понятия отечественного стандарта на бронеодежду, дается сравнение его с наиболее популярными зарубежными стандартами, приведены сведения об устройстве бронежилетов, бронешлемов и бронещитов.

В главе 2 рассмотрены основные полимерные материалы, из которых изготовляется текстильная броня, обсуждаются свойства волокон, нитей и тканей – основных элементов дискретной структуры текстильной брони.

Глава 3 посвящена подробному анализу механизмов взаимодействия пуль с текстильной броней. Изложение материала начинается с анализа ударно-волновых процессов уплотнения текстильного бронепакета на начальной стадии взаимодействия пули с бронепакетом. Далее на примере классических задач о поперечном ударе по упругим нитям объясняются механизмы торможения пули и разрушения текстильных бронепакектов. На основе энергетического анализа процесса взаимодействия пули с текстильной броней разработан подход к определению ее баллистической стойкости, позволяющий получить аналитическую зависимость предельной

скорости пробития бронепакета от его конструктивных характеристик и физико-механических свойств ткани. Приведен критерий выбора оптимальных тканей, объясняется влияние влажности бронепакета на его баллистическую стойкость. Значительный интерес могут представить экспериментальные данные по баллистической стойкости бронепакетов из различных тканей.

В главе 4, посвященной полимерной композиционной броне, рассмотрены особенности строения броневых органопластиков, проанализирована их баллистическая стойкость, приведена аналитическая зависимость для определения предельной скорости пробития. Особое внимание уделено анализу влияния кривизны оболочки бронешлема на его баллистическую стойкость, получена аналитическая зависимость для расчета предельной скорости непробития.

Глава 5 посвящена металлической броне. Поскольку в настоящее время готовится к изданию специальная монография под редакцией В.А. Григоряна, посвященная металлической броне, то в этой главе приведены лишь основные сведения о броневых сталях, высокопрочных титановых и алюминиевых сплавах, проанализированы механизмы пробития металлических бронеэлементов, рассмотрены аналитические зависимости для оценки их баллистической стойкости.

В главе 6 изложены концептуальные вопросы баллистической стойкости керамической брони. Приведены сведения об основных керамических материалах, используемых в легкой броне, выполнен подробный анализ процесса взаимодействия пуль с керамическими бронеэлементами, на основании которого выявлены механизмы, обеспечивающие их высокую баллистическую стойкость.

В главе 7, посвященной анализу баллистической стойкости многослойной комбинированной брони с внешним керамическим слоем, осуществляется синтез знаний о различных типах брони, рассмотренных в предыдущих главах. Подробно описывается инженерная методика расчета противопульной стойкости многослойной комбинированной брони с внешним керамическим слоем и следующими за ним текстильным или органо-пластиковым и металлическим слоями, соединенными между собой. Приведены примеры использования этой методики для анализа баллистической стойкости двух- и трехслойной комбинированной брони.

В главе 8, посвященной прозрачной броне, рассмотрены основные прозрачные материалы – стекла, керамики, полимеры и

способы их компоновки в многослойные защитные структуры – триплексы, обеспечивающие защиту от воздействия пуль и осколков.

Глава 9 содержит обзор информации о возможностях и перспективах использования наноматериалов для изготовления легкой брони.

В главе 10 с позиций инженера-механика подробно изложены современные представления о механизмах забронебого действия баллистического удара пуль при непробитии бронезащиты. В гидродинамическом приближении выполнен анализ физических процессов, сопровождающих забронебое действие, получено аналитическое выражение для максимального радиуса пульсирующей полости. С использованием энергетического подхода разработан количественный критерий недопущения забронебой травмы выше второй степени тяжести. В одномерном приближении выполнен математический анализ ответной реакции грудной клетки на удар бронепластины, ускоренной ударом пули. Проанализировано ударно-волновое нагружение мягких тканей, создаваемое ударом деформационного купола текстильного бронепакета.

В главе 11 описаны основные методы баллистических испытаний бронезащиты и статистической обработки результатов испытаний.

В главе 12 сформулированы основные принципы проектирования бронежилетов.

В приложениях 1–3 приведены основные характеристики СИБ, производимых на территории России.

В приложении 4 представлены данные о падении скорости пуль на траектории.

Труд по написанию книги распределился следующим образом: главы 1-10 написаны И.Ф. Кобылкиным; глава 11 написана В.А. Григоряном и В.М. Мариниым, глава 12 написана В.А. Григоряном и Е.Н. Чистяковым. В написании отдельных глав принимали участие: главы 1 – В.М. Маринин и Е.Н. Чистяков, главы 3 – В.М. Маринин, главы 5 – В.А. Григорян, Е.Н. Чистяков. Приложения написаны В.А. Григоряном, В.М. Мариниым, Е.Н. Чистяковым. Научно-методическое редактирование книги осуществлено В.А. Григоряном.

Доктор технических наук, профессор,
академик РАРАН В.А. Григорян

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АБТ – алюминиевый броневой сплав
АКМ – автомат Калашникова модернизированный
АПС – автоматический пистолет Стечкина
БЖ – бронежилет
БЗ – бронебойно-зажигательная
БЭ – бронеэлемент
ВВ – взрывчатое вещество
ВДП – вакуумно-дуговой переплав
ВИП – вакуумно-индукционный переплав
ГПУ – гексагональная плотноупакованная решетка
ГЦК – гранецентрированная кубическая решетка
ЖВО – жизненно важные органы
КАП – климатический амортизационный подпор
КК – кислородный конвертор
КМ – композиционный материал
ЛПС – легкая пуля стальная
ОЦК – объемноцентрированная кубическая решетка
ПКБ – поликарбонат
ПМ – пистолет Макарова
ПММ – пистолет Макарова модернизированный
ППЭ – пенополиэтилен
ПСМ – пистолет специальный малокалиберный
ПЭ – поражающий элемент
СВД – снайперская винтовка Драгунова
СВМ – сверхвысокомодульный материал
СИБ – средства индивидуальной бронезащиты
ТМО – термомеханическая обработка
ТТ – пистолет «Тульский – Токарева»
ТУС – термоупрочненный сердечник
УБЖ – универсальный бронежилет
ЭДП – электродуговой переплав

ЭШП – электрошлаковый переплав
ACP – автоматический пистолет Кольта
AP – бронебойная пуля
FMJ – свинцовая пуля в сплошной металлической оболочке
JHP – полуоболочечная пуля
JSP – пуля в оболочке с мягким наконечником
LRN – пуля с закругленной головной частью
S&W – Smith & Wesson

Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1. Пули стрелкового оружия

Наиболее опасными поражающими факторами на поле боя для военнослужащих являются пули, осколки и ударные волны от близких взрывов зарядов ВВ. В современных условиях практически те же поражающие факторы несут угрозу жизни сотрудникам правоохранительных органов при проведении ими специальных операций. Элементы боевой экипировки, обеспечивающие защиту от указанных поражающих факторов, называют средствами индивидуальной бронезащиты (СИБ). В состав СИБ входят: бронеодежда, шлем, щит. В последнее время разработаны взрывозащитные комплекты для разминирования различных взрывных устройств.

Пули современного стрелкового оружия весьма разнообразны (рис. 1.1) и обладают различной пробивной способностью [1.1]. Основные характеристики наиболее распространенных патронов и пуль приведены в таблицах 1.1–1.4. В большинстве случаев пули состоят из обычных элементов: сердечника, свинцовой рубашки и биметаллической (стальной, плакированной томпаком) оболочки. Пули, у которых оболочка не полностью покрывает сердечник, называют полуоболочечными. Сердечник пули может быть свинцовым (иногда для увеличения твердости добавляют сурьму) или стальным, помещенным в свинцовую рубашку. Пробивное действие пули зависит от ее конструкции, общей и удельной кинетической энергии, массы пули, прочности материала, из которого она изготовлена, а также от прочности преграды. Максимальной пробивной способностью обладают так называемые бронебойные пули, имеющие высокотвердый термоупрочненный сердечник (ТУС) из высокоуглеродистой стали. Известны также бронебойные пули с твердосплавными сердечниками из карбида вольфрама (пуля 7Н24), обладающие повышенной пробивной способностью. Броне-

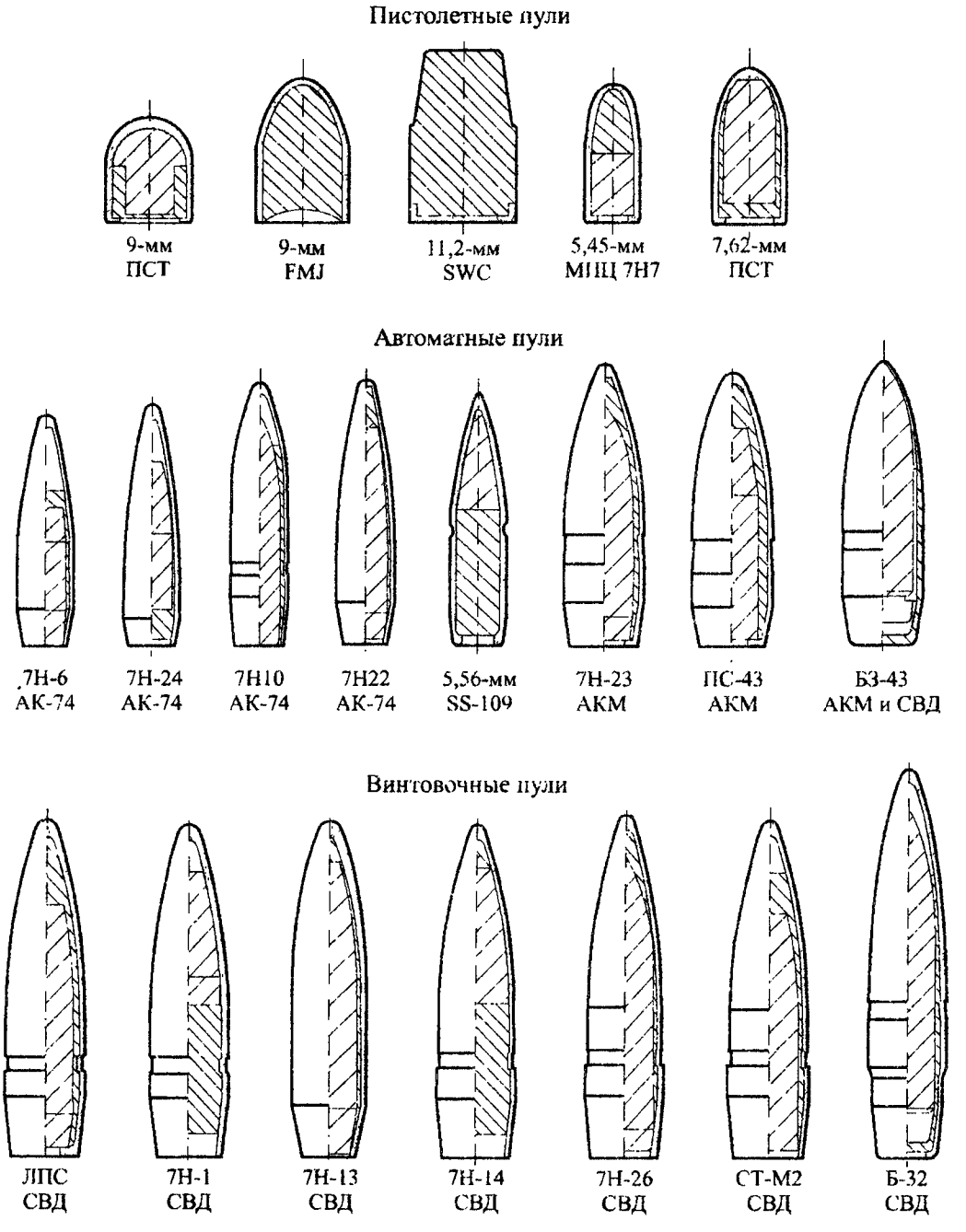


Рис. 1.1. Пули стрелкового оружия.

бойные пули выстреливаются из длинноствольного оружия и обладают высокой начальной скоростью. В последнее время бронебойные пули начали разрабатываться и для короткоствольного оружия, в частности, для пистолетов и пистолетов-пулеметов (7Н31).

Деформируемые низкоскоростные пули со свинцовыми сердечниками обладают значительно меньшей проникающей способностью по сравнению с пулями со стальными сердечниками. В большинстве случаев такие пули используются в полицейском короткоствольном оружии. Основное назначение этих пуль состоит не столько в пробивном, сколько в «останавливающем» действии.

1.2. Стандарты на средства индивидуальной бронезащиты

В соответствии с различной пробивной способностью пуль соответствующие СИБ должны обладать различной защищающей способностью. На основании многолетних исследований поражающего действия различных пуль и способов индивидуальной бронезащиты от них боеприпасы стрелкового оружия и соответствующие им защитные структуры СИБ удалось разделить на классы. В России это разделение закреплено в ГОСТ Р 50744-95 «Бронеодежда. Классификация и общие технические требования» [1.2]. В качестве средств поражения в ГОСТ Р 50744-9 представлены: короткоствольное оружие – пистолеты ПМ, ТТ, ПСМ и револьвер «Наган»; охотничье ружье 12-ого калибра; автоматическое оружие – автоматы АКМ калибром 7,62мм и АК-74 калибром 5,45 мм; снайперская винтовка Драгунова СВД калибром 7,62 мм.

Рассмотрим некоторые основные определения и понятия, введенные ГОСТ Р 50744-95, важные для дальнейшего изучения.

Защитная структура бронеодежды – совокупность защитных элементов, поглощающих и рассеивающих энергию средств поражения и, при необходимости, амортизатора для гашения динамических нагрузок, объединенных общим конструктивным решением.

Класс защитной структуры – показатель стойкости защитной структуры к воздействию средств поражения заданного вида.

Защитный элемент бронеодежды – составной элемент структуры, поглощающий и рассеивающий энергию средств поражения.

Таблица 1.1

Основные характеристики пистолетных патронов и пуль

Наименование патрона (оружие)	Индекс патрона / пули	Тип патрона	Скорость пули, м/с	Энергия пули, Дж	Масса, г			Длина, мм		$d_{серд}$, мм	Материал сердечника
					патрона	пули	сердечника	пули	сердечника		
5,45-мм патрон МПЦ (ПСМ)	7Н7 / 5,45 Пст	5,45×18 МПЦ	325	132	4,8	2,5	0.54^{+11}	14,3	6,7/1,16	4,25	Сталь + свинец
7,62-мм патрон с обыкновенной пулей (ТТ)	57-Н-132 / 7,62 Пс	7,62×25	450	557	11	5,5	–	14,0	–	–	Свинец
7,62-мм патрон с пулей со стальным сердечником (ТТ)	57-Н-134С / 7,62 Пст	7,62×25	450	552	9,8	5,45	2,25	16,3	12,6	5,85	Ст 15...45
7,62-мм патрон (револьвер «Наган»)	57-Н-122 / 7,62 Р	7,62×38Р	290	229	11,9	5,45	–	16,3	–	–	Свинец
9,0-мм патрон с пулей со свинцовым сердечником (ПМ)	57-Н-181 / 9,0 П	9×18 ПМ	315	303	10	6,1	4,8	11	–	9,00	Свинец
9,0-мм патрон с пулей со стальным сердечником (ПМ)	57-Н-181С / 9,0 Пст	9×18 ПМ	315	295	9,7	5,95	$2,1^{+2.45}$ (сталь)	12,35	9,8	7,6/ 5,85	Ст 10 .45 + свинец
Патрон 9×18 ПБМ (7Н25) с пулей повышенной пробиваемости (ПМ)	7Н25 / ПБМ	9×18 ПМ	520	480	7,4	3,55	–	12,6	–	–	Сталь
9,0-мм патрон с пулей повышенной пробивной способностью (ПМ)	РГ028 /	9×18 ПМ	325	317	11,0	6,0	–	–	–	–	–
9,0-мм патрон СП-7 с пулей с пластмассовым сердечником (ПМ)	СП-7 /	9×18 ПМ	420	529	8,0	6,0	–	–	–	–	Пластмасса
9,0-мм патрон с пулей малой пробиваемости (ПМ)	СП-8	9×18 ПМ	250	156	8,5	5	–	–	–	–	–
9,0-мм патрон с пулей повы-	7Н16	9×18	435	525	9,6	5,55	2,1	12,6	10,20	7,6	Ст. 10 . 45

Окончание табл. 1.1

Наименование патрона (оружие)	Индекс патрона / пули	Тип патрона	Скорость пули, м/с	Энергия пули, Дж	Масса, г			Длина, мм		$d_{серд}$, мм	Материал сердечника
					патрона	пули	сердечника	пули	сердечника		
шенной пробиваемости (ПММ)		ПММ									
9×19 мм патрон с пулей со стальным сердечником (Beretta и пр.)	7Н21	9×19	475	592	9,35	5,25	–	17,8	–	–	Сталь
Luger G-475 (Beretta и пр)	Luger G-475	9×19	355	504	12,0	8	–	15,6	15,00	9,0	Свинец
9,0-мм патрон с обыкновенной пулей (СПС)	СП-11 / –	9×19	–	570	12	7,5	–	–	–	–	–
9 мм (Beretta и пр.)	– / 9 mm Para	9×19	–	656	12,0	8	–	15,6	15,00	9,0	Свинец
9×21 патрон с пулей со свинцовым сердечником (СПС)	7Н28 / –	9×21	–	603	11,95	7,93	–	–	–	–	Свинец
9×21 патрон с пулей со стальным сердечником (СПС)	7Н29 / –	9×21	–	573	10,75	6,65	–	–	–	–	Сталь

Таблица 1.2

Основные характеристики патронов и пуль к автомату АКМ (АК-47)

Наименование патрона (номер чертежа)	Индекс патрона / пули	Тип пули	Скорость пули, м/с		Энергия пули, Дж	Масса, г			Длина, мм		$d_{серд}$, мм	Сердечник		Данные по пробитию
			V_0	V_{25}		патрона	пули	сердечника	пули	сердечника		материал	твердость HRC	
7,62 мм патрон образца 1943 г с пулей со стальным сердечником (3-23703)	57-Н-231/ ПС-43	притупленная	746	718	2198	16,3	7,9	3,56	26,8	20,1	5,85	Сталь 10	<25	Ст3; 10 мм, P=80 %*
7,62 мм патрон образца 1943г с пулей со стальным сердечником (4-27025)	57-Н-23 / ПС-43 ТУС	притупленная, ТУС	746	718	2198	16,3	7,9	3,56	26,8	20,1	5,85	Сталь 60Г, 65Г, 70, 75	>56	Ст 3; 5 мм 380 м v=390 м/с P=80 %, Ст 3; 3 мм 650 м v= 280 м/с, P=83 %.
7,62-мм патрон образца 1943 г. с бронебойно-зажигательной пулей (3-016692)	57-БЗ-231/ БЗ-43	заостренная	760	732	2215	16,1	7,67	4,00	27,7	22,5	6,12	Ст. У 12А	62.. 67	сталь 2П; 7 мм 160 м, v=580 м/с P=80 %
7,62-мм патрон образца 1943 г. с бронебойной пулей (4-28747)	7Н23/ бронебойная	заостренная	760	732	2282	16,3	7,9	4,16	27,4	23,2	6,14	Ст. У12А-1	65...68	сталь 2П; 5 мм 200 м из пулемета 56-Р-327 v=560 м/с P=80 %
7,62-мм патрон образца 1943 г. с зажигательной пулей БЗ	57-З-231/ БЗ	БЗ	760	730	1906	15,2	6,6	—	27,4	—	—	—	62. .67	—

* – вероятность пробития

Примечание: **Автомат АКМ (6П1).** Калибр 7,62 мм, длина 880 мм, длина ствола 415 мм, масса 3,2 кг, P_{max}(ср)=274,6 МПа, емкость магазина – 30 шт., прицельная дальность 1000 м. **Патроны** к автомату АКМ (АК-47). Калибр 7,62 мм, тип патрона 7,62×39, тип пороха Вуфл., масса пороха 1,6 г, (плотность 0,89 г/см^3), d пули 7,92мм, длина патрона $56_{-1,0}$ мм.

Таблица 1.3

Основные характеристики патронов и пуль к автомату АК-74

Наименование патрона (номер чертежа)	Индекс патрона / пули	Тип пули	Скорость пули, м/с		Энергия пули, Дж	Масса, г			Длина, мм		$d_{серд}$, мм	Сердечник		Данные по пробитию
			V_0	V_{25}		патрона	пули	сердечника	пули	сердечника		материал	твердость HRC	
5,45-мм патрон с обыкновенной пулей (4-27268)	7Н6 / 5,45 Пс	притупленная d=4,2 мм	906	880	1404	10,5	3,42	1,42	25,55	15,5	4,20	Сталь 10. .40	HRC< 25	Ст3; 5 мм, 300 м, v = 620 м/с, P=50%, жилет Ж-85Т 880 м
5,45-мм патрон с обыкновенной пулей (4-27268)	7Н6 ТУС / 5,45 Пс ТУС	притупленная d=4,2 мм, стальной ТУС	906	880	1404	10,5	3,42	1,42	25,55	15,5	4,20	Сталь 65Г, ст70, 75	>56	Ст3; 5 мм, 410 м v = 530 м/с, P = 82 %; Ст3, 3 мм, 700 м, v=364 м/с P=80%
5,45 мм патрон с пулей повышенной пробиваемости (4-28739)	7Н10/ ПП	притупленная d=1,8 мм	905	880	1478	10,7	3,61	1,72	25,7	21,5	4,20	Сталь 75, 70	>59	Ст3; 16 мм 100 м, v=800 м/с P=60%
5,45 мм патрон с бронебойной пулей (4-28745)	7Н22 / Бронебойная	заостренная	900	875	1490	10,75	3,68	1,75	25,85	21,8	4,22	Ст У 12А-1-Н	> 62	сталь 2П; 5 мм, 250 м из пулемета 6П18, P=80%, v = 653 м/с
5,45 мм патрон с бронебойным сердечником БС (4-28757)	7Н24 / Бронебойная	притупленная d=2 мм	853	830	1492	11,2	4,1	2,13	23,5	14,5	4,2/ 3,95	ВК-8	HRA= 87…88	—

Примечание: **Автомат АК-74 (6П20).** Калибр 5,45 мм, длина 956 мм, длина ствола 415 мм, масса 3,07 кг, P_{max}(ср)=294,2 МПа, емкость магазина – 30 шт., прицельная дальность 1000 м. **Патроны** к автомату АК-74. Калибр 5,45 мм, тип патрона 5,45×39, d пули 5,65мм, длина патрона $57_{-0,3}$ мм.

Таблица 1.4

Основные характеристики патронов и пуль к винтовке СВД

Наименование патрона (номер чертежа)	Индекс патрона/ пули	Форма головной части	Скорость пули, м/с		Энергия пули, Дж	Масса, г			Длина, мм		$d_{серд}$, мм	Сердечник		Пробитие	
			V_0	V_{25}		патрона	пули	сердечника	пули	сердечника		материал	твердость HRC	Сталь 3	Броня
7,62-мм патрон с пулей со стальным сердечником (3-27276, 1980 г.)	57-Н-323С/ ЛПС	плоская d=3,5 мм	847	820-835	3444	21,8	9,6	4,72	32,3	6,12	23,95	Ст. 10..30	<25	—	—
7,62-мм патрон с пулей со стальным сердечником (3-27276, 1998 г.)	57-Н-323С/ СТ-М2 (ЛПС ТУС)	плоская d=3,5 мм	848	820-835	3452	21,8	9,6	4,72	33,1	6,12	23,85	Ст 65Г, 70	> 56	3 мм, 1320м v=250 м/с P=80 %; 6 мм 660 м v=410 м/с P=80 %,	—
7,62-мм патрон с бронебойно-зажигательной пулей Б-32 (4-27366, 1980 г.)	7-БЗ-3/ Б-32	заостренная	830	800-815	3582	22,9	10,4	5,38	38,15	6,14	28,50	У12А-1-Т	65..68	—	10 мм, 200 м, v = 680 м/с, P=80 %; 7 мм, d = 550 м v = 460 м/с
7,62-мм патрон с пулей повышенной пробиваемости (4-28478, 1993 г.)	7Н13	заостренная	848	820-835	3383	21,8	9,41	5,34	33,1	6,14	28,50	У12А-1-Т	65. 68	10 мм, 450 м v=520 м/с,	10 мм, 200 м, v = 660 м/с, P = 70 %
7,62-мм патрон с бронебойной пулей БП (4-28755, 1999 г.)	7Н26	оживало заостренная	848	820-835	3506	21,8	9,75	5,52	33,5	6,14	30,50	У12А-В-1-Н	64 .68	—	10 мм, d=200 м v = 705 м/с, P=90 % из пулемета ПКТ

Окончание табл. 1.4

Наименование патрона (номер чертежа)	Индекс патрона/ пули	Форма головной части	Скорость пули, м/с		Энергия пули, Дж	Масса, г			Длина, мм		$d_{серд}$, мм	Сердечник		Пробитие	
			V_0	V_{25}		патрона	пули	сердечника	пули	сердечника		материал	твердость HRC	Сталь 3	Броня
7,62-мм снайперский патрон (4-27408, 1980 г)	7Н1	плоская d=3,3 мм	840	815-830	3457	21,8	9,8	7,23	32,55	6,62	13 (ст) +12,7 (Pb)	Ст.10..35 (2,45г) + свинец (4,78г)	<25	6 мм, 315 м, P=80 %	–
7,62-мм снайперский патрон с бронебойной пулей (4-28752, 1999 г)	7Н14	заостренная, конус 90°	840	815-830	3457	21,85	9,8	7,28	32,55	6,62	14,65 (ст) + 12 (Pb)	У12А-В-1-Н (2,5г) + свинец (4,78г)	64..68	10 мм, 300м, P=80 %	5 мм, 300 м, P=80 %

Примечание: **Снайперская винтовка Драгунова (СВД)**. Калибр 7,62 мм, длина 1225 мм, длина ствола 620 мм, масса 3,7/4,52 кг, P_{max}(ср)=284,4 МПа, емкость магазина – 10 шт., скорострельность 30 в/мин, прицельная дальность 1200 м. **Патроны**. Тип патрона 7,62×54, d пули = 7,92 мм, длина патрона $77{,}16_{-1{,}25}$ мм, тип пороха ВТ.

Забронева контузионная травма – повреждение кожного покрова и (или) внутренних органов человека от динамических нагрузок, возникающих при взаимодействии средств поражения с защитной структурой. Рассматриваемый ГОСТ допускает заброневу травму не выше второй степени тяжести: ушибленные раны, очаговые внутримышечные кровоизлияния – утрата боеспособности до 3...5 мин. Вероятность возвращения в строй через 15...20 суток – 0,85 %.

По конструктивному исполнению бронеодежда подразделяется на три типа: тип А – мягкая (гибкая) защитная структура бронеодежды на основе ткани; тип Б – полужесткая защитная структура на основе ткани с пластинами из жесткого броневого материала; тип В – жесткая защитная структура бронеодежды на основе жестких формованных защитных элементов из броневых материалов.

Все многообразие защитных структур СИБ можно разделить на следующие группы: 1) текстильная (тканая, тканевая) броня; 2) металлическая броня; 3) керамическая броня; 4) органопластиковая (композитная на основе арамидных нитей или высокопрочного полиэтилена); 5) комбинированная многослойная броня (металлотекстильная, керамикоорганопластиковая, керамикоорганопластикометаллическая и др.); 6) прозрачная броня.

Защитные структуры бронеодежды по стойкости к воздействию средств поражения подразделяются на десять классов. Характеристика классов защитных структур бронеодежды по ГОСТ Р 50744-95 приведена в табл. 1.5. По мнению военных специалистов, этот ГОСТ не лишен недостатков [1.1]. В частности табл. 1.5 не включает в качестве средства поражения осколки – высокоскоростные фрагменты, образующиеся при взрыве как штатных боеприпасов, так и самодельных взрывных устройств. Кроме этого рассматриваемый ГОСТ не дает методологической основы для классификации защитных структур с дифференцированным бронированием, например, к какому классу отнести защитную структуру 2-ого класса площадью 40...50 дм^2, содержащую керамический бронеэлемент 6-ого класса площадью 9 дм^2. Не учитывает ГОСТ и появления новых, более мощных боеприпасов и новых типов стрелкового оружия. Трудно реализуем предложенный в ГОСТ метод определения забронево контузионой травмы, поэто-

му на практике этот параметр часто оценивают глубиной отпечатка на пластилиновом блоке, который остается после попадания пули в защитную структуру, установленную на этом блоке. Не обязывает ГОСТ проведение испытаний мокрых изделий, испытаний под различными углами, в различных температурных режимах. Не оценивается ГОСТом и баллистический предел – статистический параметр, характеризующий скорость 50 % непробития защитной структуры данным средством поражения.

Необходимо отметить, что действие ГОСТ Р 50744-95 не распространяется на общевойсковые СИБ. Согласно [1.1] общевойсковые бронежилеты разделяются на противоосколочные, противопульные и с дифференцированным бронированием. Особенности устройства защитных структур общевойсковых СИБ рассмотрены в [1.1, 1.3]. По степени защиты все общеармейские бронежилеты подразделяются на 4 уровня.

Таблица 1.5

Классы защитных структур бронеодежды по ГОСТ Р 50744-95

Класс защитной структуры бронеодежды	Средство поражения (вид оружия)	Индекс патрона	Характеристики поражающего элемента		
			Тип сердечника	Масса, г	Скорость, м/с
Специальный	Холодное оружие (кинжал, нож)	–	Энергия удара 45…50 Дж		
1	Пистолет Макарова ПМ	9-мм 57-Н-181С с пулей Пст	стальной	5,9	305…325
	Револьвер “Наган”	7,62-мм патрон 57-Н-122 с пулей Р	свинцовый	6,8	275…295
2	Пистолет специальный малокалиберный ПСМ	5,45-мм патрон МПЦ 7Н7 с пулей Пст	стальной	2,5	310…335
	Пистолет Токарева ТТ	7,62-мм патрон 57-Н-134С с пулей Пст	стальной	5,5	415…445
2а	Охотничье ружье (12 калибр)	18,5-мм охотничий патрон	свинцовый	35	390…410

Окончание табл. 1.5

Класс защитной структуры бронеодежды	Средство поражения (вид оружия)	Индекс патрона	Характеристики поражающего элемента		
			Тип сердечника	Масса, г	Скорость, м/с
3	Автомат АК-74	5,45-мм патрон 7Н6 с пулей ПС	стальной	3,4	890... 910
	Автомат АКМ	7,62-мм патрон образца 1943 г. 57-Н-231 с пулей ПС	стальной	7,9	710... 740
4	Автомат АК-74	5,45-мм патрон 7Н10 с пулей ПП	стальной ТУС	3,4	890... 910
5	Винтовка СВД	7,62-мм патрон 57-Н-323С с пулей ЛПС	стальной	9,6	820... 840
	Автомат АКМ	7,62-мм патрон образца 1943 г. 57-Н-231 с пулей ПС	стальной ТУС	7,9	710... 740
5а	Автомат АКМ	7,62-мм патрон 57-БЗ-231 с пулей БЗ	специальный с ТУС	7,4	720... 750
6	Винтовка СВД	7,62-мм патрон 7Н13	стальной ТУС	9,6	820... 840
6а	Винтовка СВД	7,62-мм патрон 7-БЗ-3 с пулей Б-32	специальный с ТУС	10,4	800... 835

За рубежом также имеются стандарты на бронеодежду. В США – «Ballistic Resistance of Personal Body Armor, NIJ Standart-0101.04», 2000 г. [1.4], в Германии - «TECHNISCHE RICHTLINIE SCHUTZWESTEN», редакция декабрь 2003 г. [1.5], в Великобритании «PSDB Body Armour Standards For UK Police», редакция март 2003 г. [1.6]. Характеристика классов защитных структур бронеодежды по этим стандартам приведены в табл. 1.6-1.9. Здесь же приведены и особенности каждого из рассматриваемых стандартов.

Таблица 1.6

Классы защитных структур полицейских средств бронезащиты в США по NIJ 0101.04

Тип брони	Тип пули	Вес пули, г/ гран	Справочная скорость, м/с (± 9,1 м/с)	Число выстрелов по нормали	Максимальная глубина запреградной травмы, мм	Число выстрелов под углом 30°	Число выстрелов на броне-панель	Число выстрелов на образец	Необх. число патронов	Общее число необходимых патронов
I	.22 cal LR LRN	2,6 / 40	329	4	44	2	6	12	24	48
	.380ACP FMJ RN	6,2 / 95	322	4	44	2	6	12	24	
IIA	9 мм FMJ RN	8,0 / 124	341	4	44	2	6	12	24	48
	.40 S&W FMJ	11,7 / 180	322	4	44	2	6	12	24	
II	9 мм FMJ RN	8,0 / 124	367	4	44	2	6	12	24	48
	.357 Mag JSP	10,2 / 158	436	4	44	2	6	12	24	
IIIA	9 мм FMJ RN	8,2 / 124	436	4	44	2	6	12	24	48
	.44 Mag JHP	15,6 / 240	436	4	44	2	6	12	24	
III	7,62-мм НАТО FMJ	9,6 / 148	838	6	44	0	6	12	12	12
IV	.30 caliber M2 AP	10,8 / 166	869	1	44	0	1	2	2	2
Спец	*	*	*	*	44	*	*	*	*	*

Примечания:

а) Запреградная травма определяется по глубине отпечатка на пластилиновом блоке марки ROMA-1. Тарирование пластилина производится сбрасыванием на блок стального шара диаметром

6,3,5 мм и массы 1,043 кг с высоты 2 м. При этом глубина отпечатка не должен превышать 20±3 мм.

б) Определение запреградной травмы проводится без антитравматических вставок, которые перед испытаниями изымаются из структуры бронежилета.

в) Испытания под углами – предусмотрены. Угол к нормали бронезащиты – 30°.

г) Испытания с намоканием защитной структуры – предусмотрены. Образец укладывается горизонтально на специальный стол и подвергается дождеванию струей воды по 3 минуты с каждой стороны. Испытания после дождевания должны завершиться в течение 30 минут.

д) Испытания на определение баллистического предела – предусмотрены. Проводятся для защитных структур всех уровней, включая специальный.

Таблица 1.7

Классы защитных структур бронежилетов Германии по Technische Richtlinie «Ballistische Schutzklassen», ред. декабрь 2003 г.

Класс защиты	Калибр и тип патрона	Тип пули	Масса пули, г	Скорость $V_{2,5}$, м/с	Шаг нарезки ствола, мм	Длина ствола, мм	Поверхностная плотность защитной структуры, кг/м^2
SKL	9×19	Полнооболочечная DM 41SR	8,0	365 ± 5	250±5 %	260±3	4,5
SK1	9×19	Полнооболочечная DM 41SR	8,0	410±10	250±5 %	260±3	6,5
	9×19	QD-PEP II/s (полицейская пуля)	6,0	460±10	250±5 %	260±3	
	9×19	Action 4	6,1	460±10		260±3	

Окончание табл. 1.7

Класс защиты	Калибр и тип патрона	Тип пули	Масса пули, г	Скорость $V_{2,5}$, м/с	Шаг нарезки ствола, мм	Длина ствола, мм	Поверхностная плотность защитной структуры, кг/м^2
SK2	.357 Magnum	оболочечная с мягким носиком MsF	7.1	580 ± 10	430±5 %	300±3	30,0
SK3	5,56×45 7,62×51	SS-109 Оболочечная свинцовая DM 111	4,0 9,55	920 ± 10 830 ± 10	178±5 % 305±5 %	650±3 650±3	45,0
SK4	7,62×51	Бронебойная P80	9.45	820 ± 10	254±5 %	650±3	55,0

Таблица 1.8

Баллистическая таблица стандарта
Technische Richtlinie «Ballistische Schutzklassen»,
для специальных испытаний

Специальный класс защиты	Калибр и тип патрона	Тип пули	Масса пули, г	Скорость $V_{2,5}$, м/с	Шаг нарезки ствола, мм	Длина ствола, мм	Соответствие основному классу
Пистолет Макарова	9×18	Стальной сердечник	6,0	350 ± 10	240 ±5 %	260±3	SK1
Пистолет Токарева	7,62×25	Мягкая пуля со стальной оболочкой	5,5	500 ±10	240 ±5 %	260±3	SK1
Пистолет Токарева	7,62×25	Стальной сердечник	5,5 (2,6-сердечник)	530 ±10	240 ±5 %	260±3	SK2
АКМ	7,62×39	ПС-43 стальной сердечник	8,0	730 ±10	240 ±5 %	415±3	SK3

Окончание табл. 1.8

Специальный класс защиты	Калибр и тип патрона	Тип пули	Масса пули, г	Скорость $V_{2,5}$, м/с	Шаг нарезки ствола, мм	Длина ствола, мм	Соответствие основному классу
	7,62×51	карбидовольфрамовый сердечник	8,4	960 ±10	254 ±5 %	650±3	SK4
	7,62×54	Б-32 бронебойно-зажигательная	10,4	890 ±10	240 ±5 %	600±3	SK4

а) Запреградная травма определяется по глубине отпечатка на блоке из специальной глины. Тарировка производится сбрасыванием стального шара диаметром 63,5 мм и массы 1,04 кг с высоты 2 м. При этом глубина отпечатка не должен превышать 20 ±3 мм.

б) Допустимая глубина запреградной травмы для бронежилетов уровней 1, 2 и L – 40мм, для тактических бронежилетов – 20 мм.

в) Испытания с намоканием – не предусмотрены, хотя в предыдущих редакциях стандарта (апрель 1989 г.) эти испытания предусматривались и проводились в достаточно жестких условиях. Так испытуемый образец вертикально опускался в воду, выдерживался 1 час, затем извлекался из воды, выдерживался 3 минуты для стекания воды и подвергался испытаниям. По оценкам, проведенным Российским центром испытаний средств индивидуальной бронезащиты, такие испытания на 15...20 % жестче, чем, например, испытания с намоканием, предусмотренные стандартом NIJ 0101.04.

г) Вместо испытаний с намоканием стандартом предусматриваются так называемые климатические испытания, в которых испытуемый образец (без влагоотталкивающего чехла помещается в климатическую камеру, выдерживается 16...18 часов при температуре 40±5° и влажности 90...95 %., после чего испытывается. Эти испытания обязательны для всех классов защиты.

д) Испытания под углами предусмотрены только когда конструктивные особенности бронежилета требуют этого (наличие стыков, застежек и пр.). Испытания огнестрельным оружием и холод-

ным оружием производятся при углах 0° и 65° от нормали к бронезащите.

е) Испытания при повышенных и пониженных температурах – предусмотрены. Оценка производится при –20°С, 0° и +70°. При этом кондиционирование испытуемого образца производится в течение не менее 12 часов

Таблица 1.9

Баллистическая таблица стандарта PSDB (редакция 2003 г.)

Класс защиты	Тип и калибр оружия	Тип патрона	Масса пули, г	Минимал. дистанция обстрела, м	Скорость пули, м/с
HG1/A[a)]	9-мм пистолет	9 mm FMJ Dynamit Nobel DM11A1B2	8,0	5	360±10
	0.357 Magnum	Remington JSP R357M3	10,2	5	385±10
HG1	9-мм пистолет	9 mm FMJ Dynamit Nobel DM11A1B2	8,0	5	360±10
	0.357 Magnum	Remington JSP R357M3	10,2	5	385±10
HG2	9-мм пистолет	9 mm FMJ Dynamit Nobel DM11A1B2	8,0	5	425±10
	0.357 Magnum	Remington JSP R357M3	10,2	5	450±10
SG1	Охотничье ружье 12 калибра	Цилиндрическая пуля Winchester Rifle Lead	28,4	10	435±25
RF1	Винтовка 7,62-мм	Royal Ordnance NATO Ball L2A2	9,3	10	830±15

Примечания:

а) Допустимая глубина отпечатка при зачетных испытаниях броневой структуры класса HG1/A, не должна превышать 44 мм, для остальных классов – 25 мм

б) Запреградная травма определяется на пластилиновом имитаторе, пластилин типа Roma-1 (как в стандарте NIJ 0101.04), однако критерии оценки значительно отличаются. Так, тарирование производится сбрасыванием стального шарика диаметром 63,5 мм и массой 1,04 кг с высоты 1,5 м. Глубина отпечатка на пластилиновом имитаторе при калибровочных испытаниях не должна превышать 15 мм.

в) Испытания на мокрых образцах – не предусмотрены.

г) Испытания под углами – предусмотрены только для уровней HG1/A, HG1 и HG2. 2 выстрела из 6 обязательных производятся под углом 30°.

д) Испытания передних застежек предусмотрены.

Доля пистолетов, автоматов и винтовок иностранного производства в общей массе стрелкового оружия, имеющего распространение на территории России, слишком мала, чтобы ориентировать отечественных производителей бронеодежды на защиту от них. Однако необходимо адекватно оценивать защищающую способность отечественных бронежилетов. В табл. 1.10. дается сравнительная характеристика классов защитных структур в соответствии с российским, немецким, английским и американским стандартами.

Проникающую способность пуль стрелкового оружия можно оценить по удельной энергии воздействия $W_{уд}$ – кинетической энергии пули, отнесенной к площади миделя пули (для автоматных и винтовочных пуль – площадь миделя сердечника пули). Основные характеристики и удельная кинетическая энергия пуль, представленных на рис. 1.1, приведены в табл. 1.11. Приведенные в этой таблице данные требуют комментария.

Таблица 1.10

Сравнительная характеристика классов защитных структур по российскому, американскому, немецкому и английскому стандартам

Класс защитной структуры бронеодежды по ГОСТ Р 50744-95	Класс защиты по зарубежным стандартам		
	США	Германия	Англия
1	I	SK1	–
2	IIIA	SK2	HG2

Окончание табл. 1.10

Класс защитной структуры бронеодежды по ГОСТ Р 50744-95	Класс защиты по зарубежным стандартам		
	США	Германия	Англия
2а	–	–	SG1
3	III	SK3	–
4	III	SK3	–
5	III	SK3	RF1
5а	III	–	–
6	IV	SK4	–
6а	IV	SK4	–

Примечание:

Сравнение защитных классов проведено по результатам испытаний различных защитных структур средствами поражения, указанными в стандартах

Таблица 1.11.

Характеристики некоторых пуль стрелкового оружия

Средство поражения	Калибр, мм	Масса, г	Скорость, м/с	Кинетическая энергия, Дж	Удельная кинетическая энергия, Дж/мм^2
ПМ, Пст	9	5,9	290...315	250...300	4,7
Parabellum, FMJ	9	8	350...400	490...640	10,1
Magnum 44, SWC	11.2	15,5	430...445	1430...1540	15,6
ПСМ, МПЦ 7Н7	5,45	2,5	310...325	120...130	35
ТТ, Пст	7,62	5,5	415...445	470...540	34
АК–74, 7Н6	5,45	3,4	870...890	1290...1350	140
АКМ, ПС–43	7,62	7,9	710...745	1990...2080	165
СВД, ЛПС	7,62	9,6	820...835	3230...3270	205
М16–А2, SS–109	5,56	4,0	940...960	1770...1840	375

Практически все пули отечественного короткоствольного стрелкового оружия имеют стальной сердечник, который при взаимодействии с текстильной броней не деформируется, тогда как пистолетные и револьверные пули западного производства, по большей части свинцовые, при взаимодействии с любым типом защитных структур СИБ интенсивно расплющиваются (рис. 1.2, 1.3).

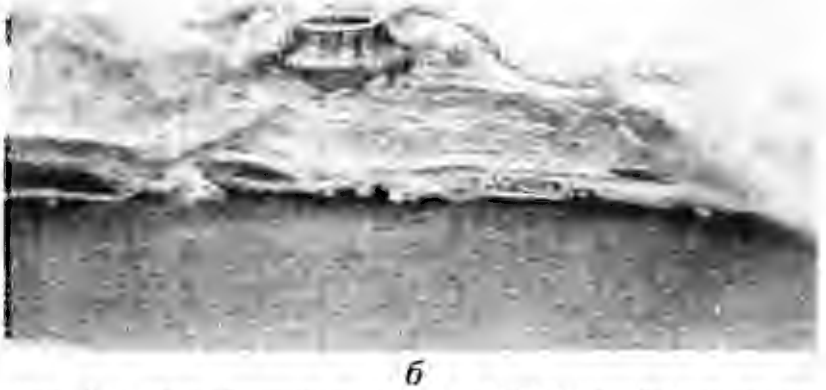
Например, площадь контакта пули SWC (свинцовая полупыж) пистолета Magnum .44 в процессе взаимодействия с текстильной броней увеличивается в 4 раза. При расчете удельной энергии воздействия (см. табл. 1.11) для свинцовых пуль площадь контакта принималась равной площади миделя пули. Поэтому значение удельной энергии воздействия свинцовой пули FMJ RN Parabellum оказалось значительно выше, чем пули пистолета Макарова, хотя в действительности они обладают почти одинаковой проникающей способностью.

В связи с вышесказанным, сопоставление классов защитных структур отечественного и зарубежного производства, приведенное в табл. 1.10, достаточно условно. Так, например, текстильные защитные структуры 2 класса по ГОСТ Р 50744-95 по пулестойкости значительно превосходят аналогичные структуры по IIIa и SK2 классу американского и немецкого стандартов соответственно. В случае автоматического оружия наблюдается противоположная ситуация: требования к защитным структурам по IV классу NIJ 0101.04 значительно превышают требования российского стандарта к бронезащите по 4-5 классам. Такое различие в классификации защитных структур приводит к коренным различиям в подходах к проектированию СИБ в России и за рубежом.

Все приведенные выше стандарты распространяются только на бронеодежду (бронежилеты) и не применяются для других видов индивидуальной защиты. Для оценки защитных характеристик шлемов за рубежом применяют соответствующие специальные стандарты, для щитов существуют свои стандарты. Так, в США защитные характеристики шлемов определяются стандартом NIJ 0106.01, щитов – стандартом NIJ 0108.03.

В табл. 1.12 приведены уровни защиты шлемов по стандарту США NIJ 0106.01.

а



б

Рис. 1.2. Вид свинцовых пуль FMJ RN Parabellum после изъятия из текстильного бронепакета (*а*) и в составе текстильного бронепакета (*б*).

Рис. 1.3. Вид пули SWC пистолета Magnum .44, изъятой из текстильного бронепакета.

Таблица 1.12.

Уровни защиты шлемов
по стандарту США NIJ 0106.01, редакция 1991 г.

Уровень защиты	Параметры испытаний			Требования		
	Тип пули	Масса пули, г	Рекомендуемая длина ствола, см	Скорость пули, м/с	Число зачетных выстрелов	Допустимая глубина внедрения, мм
I	.22 LRNV свинцовая	2,6	15…16,5	320±12	4	0
	.38 Special RN свинцовая	10,2	15…16,5	250±15	4	0
IIA	.357 Magnum JSP	10,2	10…12	381±15	4	0
	9мм FMJ	8,0	10…12	332±15	4	0
II	.357 Magnum JSP	10,2	15…16,5	425±15	4	0
	9мм FMJ	8,0	10…12	358±15	4	0

Испытания проводятся на жестком макете головы стандартизованного размера. Факт пробития или выхода вторичных осколков определяется с помощью контрольных алюминиевых экранов, устанавливаемых внутри макета головы в специальной полости в 2-х взаимно-перпендикулярных плоскостях (рис.1.4.). Величина прогиба каски или запреградная травма не определяются.

Если сравнить эту баллистическую таблицу с баллистической таблицей стандарта NIJ Std-0101.04 на бронежилеты, то видно, что требования по защите к каскам и бронежилетам при одних и тех же уровнях защиты разные, причем к каскам предъявляются менее жесткие требования, чем к бронежилетам.

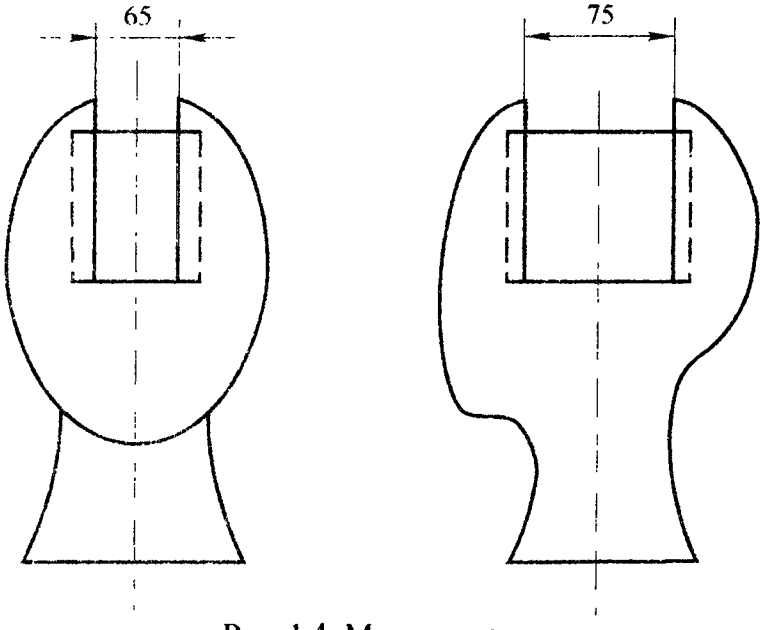


Рис. 1.4. Макет головы

В последнее время в различных информационных и рекламных материалах появилась информация о касках с уровнем защиты IIIA, причем в большинстве случаев под уровнем IIIA подразумевается соответствующий уровень бронежилетного стандарта NIJ Std-0101.04. Однако на самом деле приводимый в требованиях на защиту касок уровень IIIA никакого отношения к стандарту на бронежилеты не имеет. Одна из причин – допуск высокой запреградной травмы (44 мм), что для шлемов просто неприемлемо. При задании такого высокого уровня противопульной защиты разработчики все-

гда делают к нему примечание, в котором оговаривают, по какому именно стандарту необходимо оценивать данный уровень защиты каски. Чаще всего делается ссылка на стандарт NIJ Std-0108.03 (Противопульная стойкость стекол и щитов), где вообще не предусмотрена оценка запреградной травмы.

Шлемы защищают наиболее уязвимую часть человеческого тела, поэтому к ним помимо требованиям по пулестойкости, предъявляются требования по снижению динамических нагрузок. Стандарт NIJ 0106.01 оценивает эти нагрузки двумя способами.

Если прогиб шлема при ударе пули меньше, чем зазор между шлемом и головой, т.е. шлем не касается головы при ударе, то измеряется ускорение в центральной точке головы, которое не должно превышать контрольную величину. Контрольная величина ускорения определяется ударом по незащищенному макету головы ударника с энергией в 14,5 Дж. Считается, что удар такой силы не нанесет вреда здоровью бойца.

Если же прогиб шлема значителен и шлем в момент удара касается головы, то тогда измеряется ускорение в центре головы, и оно не должно превышать 400 g.

Для определения противоосколочной стойкости защитных структур СИБ ввиду большого многообразия форм и масс реальных осколков применяют стандартные имитаторы осколков. В зарубежной практике испытания на противоосколочную стойкость в большинстве случаев проводят с использованием имитаторов осколков FSP, введенным стандартом НАТО STANAG 2920 и военным стандартом США MIL-662F. Этот имитатор имеет форму компактного цилиндра с двумя скосами на переднем торце (рис. 1.5). Хотя стандартом НАТО предусмотрен целый ряд имитаторов с массой от 0,0875 г до 53,8 г, на практике наиболее часто используется имитатор осколков массой 1,1 г.

В России при определении противоосколочной стойкости защитных структур СИБ в качестве имитаторов осколков применяют стальные поражающие элементы кубической формы, шарики и стреловидные поражающие элементы. Наибольшее распространение получили испытания со стальными шариками массой 1,03 г и диаметром 6,3 мм.

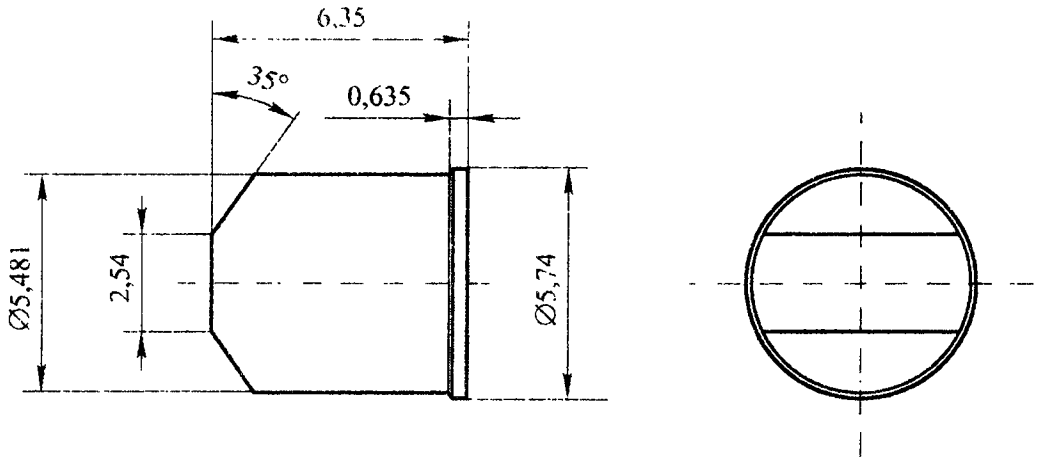


Рис. 1.5. Имитатор осколка по STANAG 2920.

В настоящее время среди специалистов созрело понимание того, что испытание защитных структур на прострел шариками лишь частично характеризует их противоосколочную стойкость, поскольку при таких испытаниях никак не проявляется режущее действие острых ребер, имеющихся у реальных осколков.

Противоосколочная стойкость оценивается, как правило, по критерию v_{50}, где v_{50} – баллистический предел, который также оценивается по определенным правилам. В США эти правила закреплены соответствующими стандартами.

1.3. Общие сведения об устройстве бронежилетов

Устройство и состав бронежилетов рассмотрим на примере общевойсковых бронежилетов [1.1, 1.3]. Несмотря на многообразие конструкций отечественных бронежилетов, большая их часть состоит из элементов одинакового назначения, основными из которых являются: грудная и спинная секции, бронеэлементы или бронепанели. Грудная и спинная секции соединяются друг с другом с помощью плечевых и боковых разъемно-регулировочных устройств и застежек, образуя бронежилет. Представление о составе и устройстве бронежилетов дает рис. 1.6, на котором приведена схема общевойскового бронежилета 6Б12.

Кроме основных элементов, в состав бронежилета могут входить дополнительные: элемент паховой защиты, наплечники, шей-

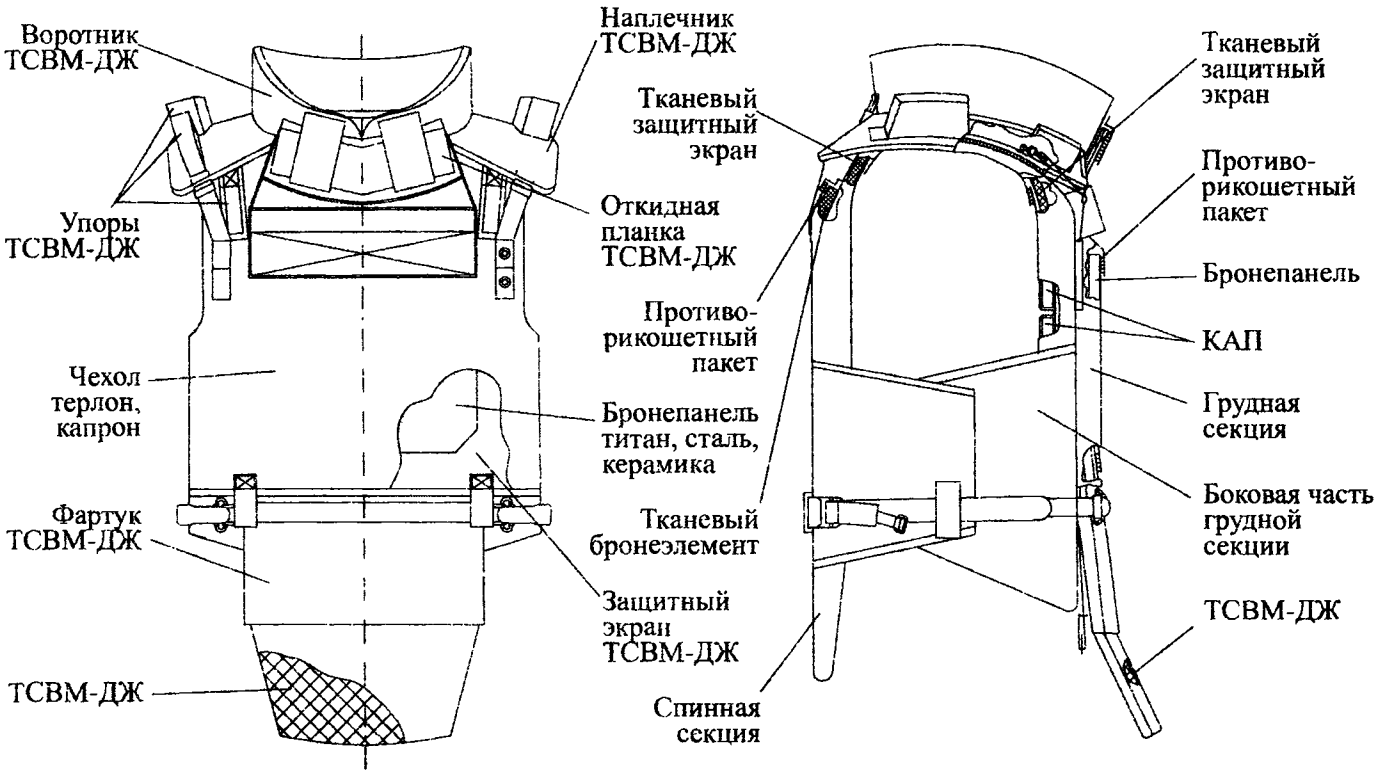


Рис. 1.6. Состав и устройство бронежилета 6Б12.

но-плечевая накладка, воротник, климатический амортизационный подпор (КАП), внешние чехлы, плечевые валики для удобства переноски оружия, транспортно-разгрузочные системы для переноски боевой экипировки.

Грудная и спинная секции бронежилетов обеспечивают, как правило, защиту торса от осколков, образующихся при взрыве снарядов, мин, гранат, и холодного оружия и включают в свой состав многослойные защитные экраны из различных баллистических тканей. Дополнительные элементы также включают в свой состав защитные экраны из баллистических тканей. В бронежилете 6Б12 использованы отечественные арамидные ткани типа ТСВМ-ДЖ

Для противопульной защиты используются усиленные баллистические тканевые пакеты, а также алюминиевые, титановые, стальные бронеэлементы или монолитные керамико-органопластиковые бронепанели. Бронеэлементы или бронепанели размещаются в специальных карманах, расположенных на чехлах бронежилетов. Как правило, внешняя поверхность карманов содержит противорикошетный пакет из нескольких слоев баллистической ткани, предназначенный для улавливания вторичных осколков от разрушающихся пуль и бронеэлементов или бронепанелей. С внутренней стороны грудной и спинной секций располагается климатический амортизационный подпор из пенополиэтилена, предназначенный для снижения заброневой контузионной травмы и образования каналов для естественной вентиляции заброневого пространства.

В настоящее время на вооружение Российской армии приняты бронежилеты 6Б23, 6Б23-1, 6Б23-2 (рис.1.7) [1.3]. Защитные экраны этих бронежилетов общей площадью не менее 48 дм^2 состоят из 30 слоев ткани ТСВМ-2. Противоосколочная стойкость защитных экранов (стальной шарик массой 1,03 г), характеризуемая 50 %-ной скоростью пробития, составляет не менее 540 м/с Грудная секция бронежилета 6Б23, усиленная текстильным бронепакетом площадью 8 дм^2 из ткани арт. 11938, обеспечивает защиту по 2-ому армейскому классу – не пробивается с 5 м пулями пистолета ТТ и ПММ. Масса этого бронежилета составляет 4,0 кг. Необходимо отметить, бронежилеты серии 6Б23 обычно дополнительно комплектуются транспортными жилетами массой 2,3 кг.

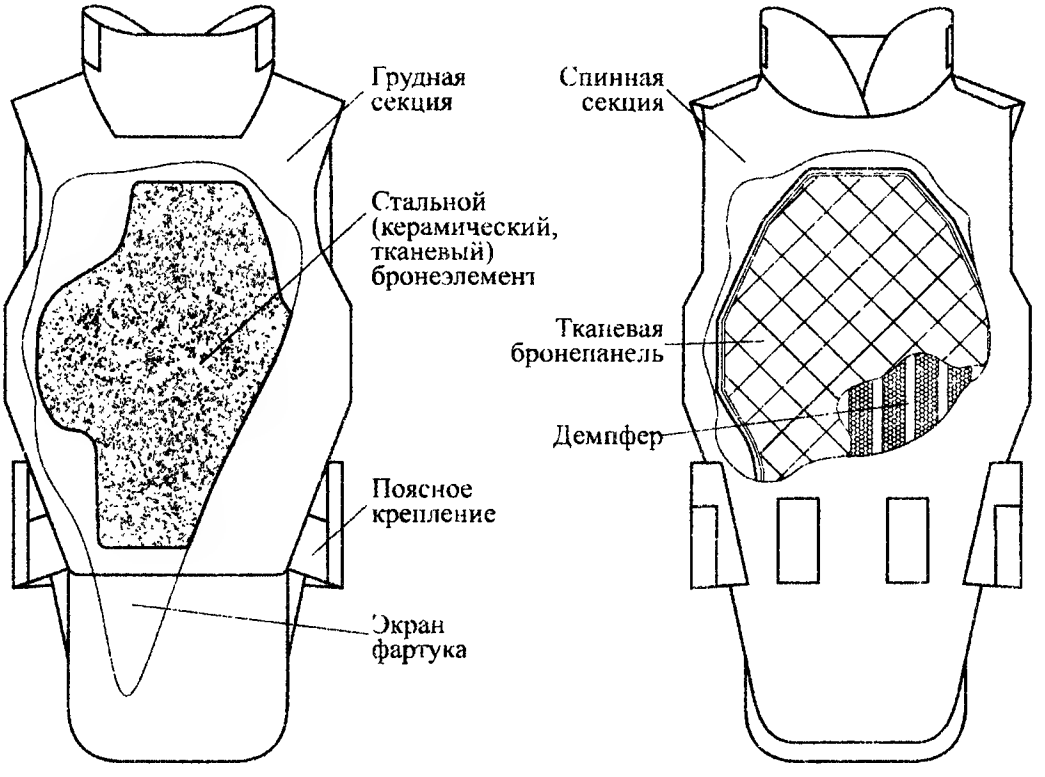


Рис. 1.7. Состав и устройство бронежилетов серии 6Б23:
а – вид спереди; *б* – вид сзади.

Установка стальных бронеэлементов толщиной 6,3 мм, площадью не менее 8 дм^2 в грудную секцию (бронежилет 6Б23-1) обеспечивает защиту по 3-ему армейскому классу при обстреле из АКМ пулями с ТУС с расстояния 10 м. Стальной бронеэлемент не пробивается бронебойными пулями винтовки М16А2 и винтовочными пулями винтовки М16А1 с расстояния 25 м. Пуля 7Н24 автомата АК-74 не пробивает грудную секцию со стальным бронеэлементом с расстояния 50 м. Масса бронежилета 6Б23-1 (без транспортного жилета) 7,9 кг.

Установка керамических бронепанелей (бронежилет 6Б23-2) делает бронежилет устойчивым к воздействию бронебойных пуль винтовки СВД: бронебойно-зажигательная пуля Б-32 не пробивает защиту бронежилета с расстояний 100 м, а пуля БЗ – с расстояния 50 м. Масса бронежилета 6Б23-2 (без транспортного жилета) со-

ставляет 7,2 кг. Этот бронежилет соответствует 4 уровню общеармейской классификации.

Отдельной проблемой для бронежилетов является проблема защиты от холодного оружия. Используемые преступниками различные колющие предметы (шило, заточка) достаточно легко проникают сквозь стандартные тканевые преграды, а использование жесткой защиты от этого вида оружия делает бронежилет малоподвижным, тяжелым и неэргономичным. Поэтому во всем мире сейчас ведутся разработки гибких защитных структур, обеспечивающих защиту от холодного оружия. Для этих целей предусматриваются ткани с абразивным напылением, специальные каландрированные ткани с плотным плетением, хотя не исключается применение тонколистового высокопрочного алюминия или органопластиков.

Как для противопульной или противоосколочной защиты, так и для оценки защиты от холодного оружия разработаны соответствующие стандарты. Во многих странах такие стандарты действуют давно. В США защита от холодного оружия колющего действия регламентируется стандартом NIJ 0115.00 «Стойкость индивидуальной бронезащиты к холодному оружию», («Stab Resistance of Personal Body Armor» – редакция сентябрь 2000 г.) [1.7]. Этим стандартом определен тип холодного оружия (ножи и заточка) и допустимая энергия удара (не выше 65 Дж). Внешний вид лезвий ножей приведен на рис. 1.8. В Великобритании стандартом «PSDB 7/03/C – Knife and Spike Resistance» предусмотрена защита не только от ножа и заточки, но даже от укола иглы.

Характеристики бронежилетов основных российских разработчиков и производителей бронеодежды приведены в Приложении 1.

1.4. Общие сведения об устройстве бронешлемов

Бронешлемы предназначены для защиты головы от воздействия пуль, осколков и ударов массивными предметами. Устройство и состав бронешлемов рассмотрим на примере общевойсковых защитных шлемов [1.3]. Шлем состоит из корпуса (колпака), подтулейного устройства и подбородочного ремня (рис. 1.9). Корпус являет-

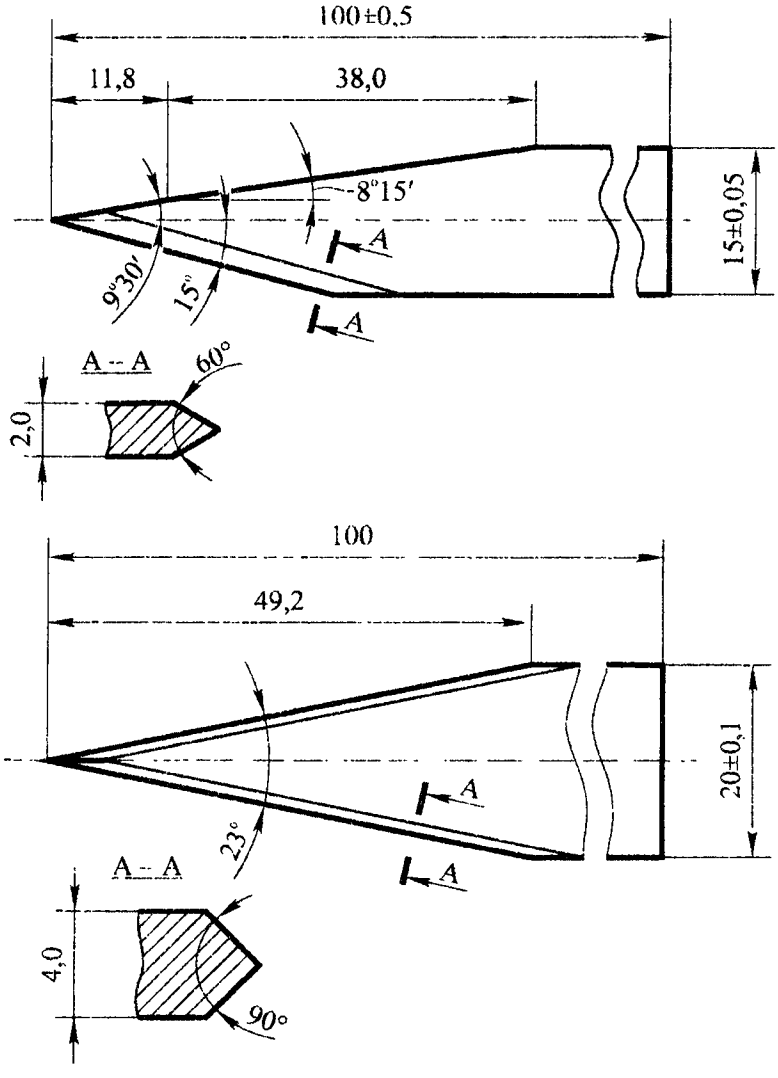
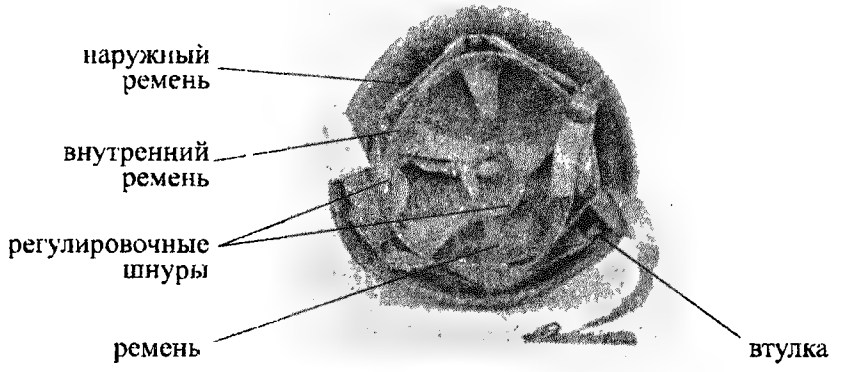
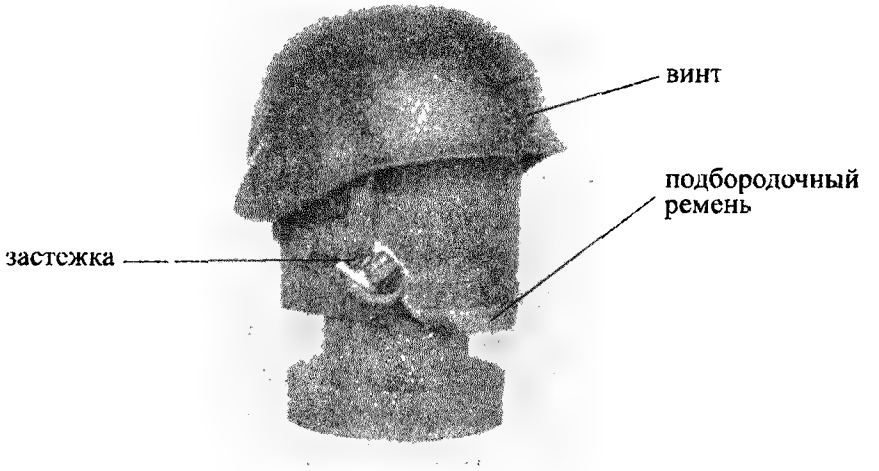


Рисунок 1.8. Средства испытания, применяемые для определения стойкости к холодному оружию, в соответствии со стандартом NIJ 0115.00. Вверху – лезвие ножа *P*1, внизу – *S*1.

ся основным защитным элементом и может быть стальным (СШ-68), органопластиковым (6Б7, 6Б26, 6Б27, 6Б28) или комбинированным – титановым с органопластиковым подпором (6Б6). Подтулейное устройство представляет собой регулируемую систему подвесных ременных лент, прикрепленных к корпусу шлема и обеспечивающих его размещение на голове с зазором 15...20 мм



а



б

Рисунок 1.9. Состав и устройство бронешлема: *а* – вид снизу; *б* – вид спереди

между корпусом шлема и головой. Подбородочный ремень служит для надежного закрепления шлема на голове. В перспективе шлем будет оснащаться различными приборными комплексами, обеспечивающими выживаемость бойца на поле боя. К ним относятся приборы ночного видения, навигации, связи и т.д. Все это вынуждает разработчиков минимизировать массу защитной оболочки шлема. В настоящее время удалось снизить массу шлемов с 1,5 кг до 0,9 кг при сохранении и даже увеличении их защитных характеристик.

Шлемы для правоохранительных органов более разнообразны по защищающей способности и конструкции [1.8, 1.9]. К противоударным шлемам предъявляются требования защиты головы, лица и глаз от удара камней, палок, металлической арматуры и т.п. Такие шлемы, кроме обычных элементов, могут содержать прозрачные ударопрочные забрала и бармицу (защита шеи). К штурмовым шлемам для спецподразделений предъявляются более высокие требования по защите, вплоть до защиты от пуль длинноствольного оружия. Штурмовые шлемы обладают достаточно большой массой, а время их непрерывного ношения может быть ограничено несколькими десятками минут.

Основные характеристики шлемов отечественных производителей приведены в Приложении 2.

1.5. Общие сведения об устройстве противопульных щитов

Щиты в последнее время становятся неотъемлемой частью индивидуальной бронезащиты сотрудников правоохранительных органов. Они просты, универсальны, обеспечивают достаточный уровень защиты при большой защищаемой площади, значительно снижают уровень возможной запреградной травмы.

Поэтому номенклатура этого вида СИБ стремительно растет. Сегодня правоохранительные органы имеют возможность оснащаться щитами от 1 до 6 классов защиты. Причем масса щитов не превышает 25...30 кг при площади в 40...50 дм^2. В качестве материалов используются как обычные противопульные броневые стали, так и композиционные и органо-керамические. Щиты, как правило, оснащаются смотровым окошком того же уровня защиты, дополнительными приборами (электрошок, световые лампы и т.д.). Специальные типы щитов изготавляются в виде складных папок, чемоданов, планшетов, что позволяет транспортировать их скрытно и применять неожиданно для нападающего.

Основные типы щитов, производимых в России, представлены в Приложении 3.

ЛИТЕРАТУРА

1.1. Концептуальные основы создания средств индивидуальной защиты. Часть I. Бронежилеты. Под общ. ред. В.Г. Михеева. М.: Межакадемическое изд. «Вооружение. Политика. Конверсия», 2003. – 340 с.

1.2. ГОСТ Р 50744-95 «Бронеодежда. Классификация и общие технические требования».

1.3. Средства индивидуальной бронезащиты (Руководство службы). – М.: Братишка, 2004.

1.4. Стандарт США NIJ Std-0101.04 «Баллистические характеристики средств индивидуальной защиты», («Ballistic Resistance of Personal Body Armor», редакция 2000 г.).

1.5. Стандарт Германии «Бронежилеты», (Technische Richtlinie «Ballistische Schutzklassen», редакция декабрь 2003 г).

1.6. Стандарт Великобритании на средства индивидуальной защиты для полиции, («PSDB Body Armour Standards For UK Police», редакция 7/03, 2003 г.)

1.7. Стандарт США NIJ 0115.00 «Стойкость индивидуальной бронезащиты к холодному оружию», («Stab Resistance of Personal Body Armor» редакция сентябрь 2000 г)

1.8. Стандарт США NIJ Std-0106.01 «Защитные каски», (NIJ Standard for Ballistic Helmets», редакция 1981 г (взамен NILESJ-STD-0106.00 редакции 1975 г.))

1.9. Сильников М.В., Химичев В.А. Средства индивидуальной бронезащиты. Учебное пособие. – СПб.: Фонд «Университет», 2000.

Глава 2. ТЕКСТИЛЬНАЯ БРОНЯ

2.1. Материалы текстильной брони

Основой текстильной брони являются высокопрочные высокомодульные синтетические волокна. Полимеры, из которых получают такие волокна, делятся на жестко- и гибкоцепные. Примеры первых – ароматические полиамиды: полипарафенилентерефталамид (Кевлар, Терлон, Тварон), полиамидобензимидазол на основе гетероциклического парадиамина и терефталоилхлорида (СВМ) и др. К жесткоцепным полимерам относятся также параарамидные волокна с торговым названием Русар и Армос. Эти волокна имеют самые высокие механические свойства среди всего семейства параарамидных волокон. Прочная водородная связь Н-О, связывающая с помощью амидных групп ароматические кольца, придает длинномерным макромолекулам жесткость, в результате чего в волокнах возникают структуры, напоминающие системы связанных длинных прутьев. Средние физико-механические характеристики параарамидных волокон составляют [2.1]: плотность $\rho_м$ = 1,45…1,47 г/см^3, модуль упругости (динамический) E = 100…150 ГПа, прочность на растяжение $\sigma_р \cong 3{,}5$ ГПа, удлинение при разрыве $\varepsilon_р \cong 3$ %. Точные значения соответствующих характеристик для различных параарамидных волокон приведены в табл. 2.1.

Сочетание высокого модуля упругости и относительно низкой плотности полимера приводит к очень высоким значениям продольной скорости звука в волокнах $c = \sqrt{E/\rho_м} = 9...10$ км/с, обеспечивающей быстрое превращение кинетической энергии пули в работу деформирования достаточно большого объема защитного материала, что наряду с исключительно высокой прочностью волокон на растяжение определяет эффективность текстильной брони.

Таблица 2.1.

Физико-механические характеристики арамидных волокон

Марка материала (страна)	Плотность, кг/м^3	Прочность при растяжении, МПа	Удлинение при разрыве, %	Модуль упругости, ГПа
Параарамидные волокна				
Армос (Россия)	1450	5000-5500	3,5-4,5	140-142
СВМ (Россия)	1430	3800-4200	4,0-4,5	120-135
Терлон (Россия)	1450	3100	2-3,5	100-150
Кевлар-29 (США)	1440	2920	3,6	69-77
Кевлар-129 (США)	1440	3200	3,6	75-98
Тварон (Нидерланды)	1440	2800	3,3-3,5	80-120
Технора (Япония)	1390	3000-3400	4,2	71-83
Полиэтиленовые волокна				
Спектра–900 (США)	960	2700	4,5	124
Спектра–1000 (США)	970	3200	–	177
Дайнема SK–60 (ДСМ, Голландия)	970	2700	3,5	87
Дайнема SK–66 (ДСМ, Голландия)	970	3100	3,5	100
Текмилон, (Япония)	960	250–2900	5,1	100
Эспелен (Тверь, Россия)	970	2900	6,0	130–170

Гибкоцепные полимеры, из которых получают весьма перспективные высокопрочные высокомодульные синтетические волокна, состоят из гибких алифатических звеньев. К ним относятся полиэтилен, полипропилен, поливиниловый спирт и др. Торговые названия и физико-механические свойства волокон из сверхвысокомолекулярного сверхвысокоориентированного полиэтилена, выпускаемых и используемых в СИБ в настоящее время, приведены в

табл. 2.1. Прочностные характеристики полиэтиленовых волокон весьма высоки и при низкой их плотности (0,94...0,97 г/см^3) по удельным значениям (на единицу массы) они заметно превосходят параарамидные волокна. Именно эти качества делают полиэтиленовые волокна перспективным материалом для изготовления броневлементов защитных структур. К недостаткам полиэтиленовых волокон по сравнению с параарамидными волокнами следует отнести ограниченную температуру эксплуатации (до 90...110 °С) и достаточно высокую горючесть.

В настоящее время в наибольшей степени распространены две технологии получения полимерных высокопрочных высокомодульных волокон: формование из жидкокристаллического состояния и метод гель–формования. Жидкокристаллический полимер имеет структуру промежуточную между кристаллической и аморфной, когда макромолекулы уложены в строго ориентированном порядке в пределах небольших областей – доменов, которые под действием поля напряжения ориентируются вдоль направления вытяжки. Волокнообразующий полимер в растворенном состоянии при определенной концентрации и температуре переходит в жидкокристаллическое состояние. Из полимера в таком состоянии формуют волокна путем их вытяжки через фильеру и последующей протяжки через ванну с холодной водой (~ 0 °С). Перед прядением волокон в нити их дополнительно нагревают и вытягивают. При нагревании жесткие цепи макромолекул приобретают подвижность, а действие растягивающих напряжений их дополнительно упорядочивает, что ведет к упрочнению волокон и увеличению модуля упругости. Технологию получения волокон из полимера, находящегося в жидкокристаллическом состоянии, разработали в начале 1970-х годов специалисты американской фирмы «Du Pont».

Макромолекулы в СВМ волокнах в основном ориентированы в направлении оси волокна, поэтому свойства волокон (прочность, модуль упругости и др.) различны вдоль и поперек него. Чем выше степень ориентации макромолекул и чем они длиннее, тем выше прочность вдоль волокна. Основная проблема достижения высоких характеристик состоит в том, чтобы добиться высокой степени

ориентации в процессе вытяжки волокон и избежать разрыва макромолекул.

Некоторые полиарилатные (ароматические полиэфирные) полимеры переходят в жидкокристаллическое состояние при их нагревании. В отличие от арамидов их довольно легко перерабатывать, получая волокна из расплава. В США и Японии выпускают несколько подобных полимерных волокон, и некоторые из них (Ekonol, Vectran) по своим механическим характеристикам мало уступают арамидным волокнам.

В 1970-е годы голландской фирмой «DSM» была разработана технология получения волокон из раствора сверхвысокомолекулярного полиэтилена путем их сверхвысокой вытяжки. Раствор полимера охлаждают, он переходит в состояние геля (отсюда название технологии – гель-формование), и тогда из него с высокой кратностью вытягивают гель-волокна. Метод довольно простой и технологичный – скорость приема волокна на бобину может достигать 50 м/с и выше. Единственное условие – полимер должен состоять из макромолекул с очень большой молекулярной массой $(0{,}5\ldots1{,}0)\cdot10^6$, так как только в этом случае гель-раствор имеет необходимую сетчатую структуру, образованную молекулярными цепями, связанными микрокристаллическими узлами. При вытяжке волокон молекулярные цепи распрямляются и вытягиваются вдоль волокон. При этом часть молекулярных цепей разрывается, из-за чего система может вытягиваться довольно сильно, образуя волокна с высокими прочностными характеристиками.

Специалисты считают, что волокна, полученные гель-формованием, – это материал нового поколения, обладающий уникальным сочетанием свойств: высокими прочностью, жесткостью и, что важно для защитных структур СИБ, низкой плотностью. Полиэтиленовые волокна Спектра, Дайнема, Текмилон при средней плотности 0,97 г/см^3 имеют модуль упругости 60…160 ГПа, предел прочности 1,5…4,0 ГПа, удлинение при разрыве 3…6 %.

Рекордно высокие механические свойства имеют волокна и нити на основе полулестничных полимеров поли-пара-фениленбензо-бис-оксазола – PBO (торговое название Zylon или Зилон) и поли-пара-фениленбензо-бис-тиазола – PBT. При плотности этих материалов 1,56…1,58 г/см^3 модуль упругости достигает значения 300 ГПа, предел прочности 5,5…6,0 ГПа, удлинение при

разрыве составляет 2...2,5 % [2.1]. Их широкое применение в качестве текстильной брони сдерживается высокой стоимостью.

В настоящее время ведется поиск новых технологий и материалов для получения сверхпрочных волокон. В научной литературе обсуждаются методы получения молекулярных композитов (или нанокомпозитов), когда смешивание различных полимеров (например, жесткоцепных и гибкоцепных) происходит на молекулярном уровне или наноуровне.

2.2. Волокна, нити и ткани. Метрология волокнистых материалов

Как правило, текстильная броня состоит из большого количества слоев ткани, которая изготовляется на ткацких станках из нитей. Нити (комплексные нити) состоят из отдельных волокон, соединенных между собой химически – склеиванием или механически – скручиванием. Фиксация волокон относительно друг друга при скрутке происходит за счет сил трения между волокнами. Прочность механического соединения волокон в нить определяется круткой – числом кручений на единицу длины или углом кручения, измеряемым между волокном и осью нити. При увеличении крутки возрастает поверхность контакта между отдельными волокнами и, следовательно, возрастает прочность нити. Однако эта тенденция сохраняется лишь до определенного предела.

Волокна и нити относят к одномерным материалам, поскольку один из их размеров много больше двух других. Исходя из специфической геометрии волокон и нитей, текстильная промышленность создала и своеобразную систему мер, относящуюся к толщине волокон и нитей. Везде ниже, говоря о нитях или волокнах, будем употреблять термин нить, если это не искажает смысл сказанного.

Метрический номер волокна или нити $N_м$ измеряется числом метров, заключающихся в одном грамме нити. Более совершенная мера – толщина нити, принятая в большинстве стран, это «текс», соответствующий массе в граммах 1000 м нити (1 текс = 1 г/км = 1 мг/м). В зарубежной литературе находит употребление единица меры толщины нитей «денье» – масса в граммах 9000 м нити. Перевод из одной меры толщины (или как принято в текстильной

промышленности «линейной плотности») в другую производится следующим образом: 1 текс = 9 денье, 1 денье = 1,11 децитекс (дтекс), метрический номер $N_м$ = 1000/текс.

Чтобы определить условный диаметр нити $d_{усл}$ (условный, поскольку поперечное сечение нити редко бывает круглым), необходимо знать плотность полимера $\rho_м$, из которого состоит нить. Формула для пересчета толщины в тексах в условный диаметр в миллиметрах имеет вид [2.2].

$$d_{усл} = 0{,}0357\sqrt{\frac{текс}{\rho_м}}\,.$$

В этой формуле $[\rho_м]$ = г/см^3.

Прочность волокон и нитей обычно определяется в смешанной системе единиц – в сантиньютонах на текс (сН/текс) или в граммсилах на текс (гс/текс). Формулы для перевода размерностей прочностных характеристик из смешанной системы единиц в СИ имеют вид: 1 МПа = $\frac{0{,}1}{\rho_м}$ сН/текс = $\frac{0{,}102}{\rho_м}$ гс/текс = 0,102 кгс/мм^2 = $\frac{0{,}0113}{\rho_м}$ гс/денье [2.2].

Важной особенностью волокон является их высокая устойчивость к изгибу, т.е. способность выдерживать без разрушения очень резкие перегибы. Это свойство основано на том, что благодаря малым поперечным сечениям волокон (10...50 мкм) напряжения, возникающие в периферийных областях волокна при изгибах, не достигают предельных значений, отвечающих прочностным показателям. Это отличает волокна от объемных полимерных материалов, имеющих большие поперечные размеры (> 1 мм).

Формулы для определения деформации и напряжения, возникающих в упругом волокне при изгибе, имеют вид

$$\varepsilon = \frac{1}{2\cdot\frac{R}{d}+1} \approx \frac{d}{2R};\quad \sigma = E\cdot\varepsilon,$$

где R – радиус изгиба, d – диаметр волокна.

Оценим напряжения и деформации, возникающие в волокнах диаметром d = 0,03 мм и 1 мм при их изгибе с радиусом кривизны

R = 5 мм. Полагая E = 100 ГПа, получим: в тонком волокне ε = 0,3 %, σ = 0,3 ГПа; в толстом ε = 10 %, σ = 10 ГПа. Сравнивая вычисленные значения деформаций и напряжений с предельными (табл. 2.1) видим, что при изгибе тонкого волокна предельные значения не достигнуты, а толстое волокно при тех же условиях нагружения будет разрушено.

По мере уменьшения радиуса изгиба напряжения резко возрастают, в результате чего волокна не выдерживают малых радиусов изгиба. Например, при затягивании узла волокна могут хрупко разрушаться. В связи с этим в практике физико-механических испытаний волокон для характеристики их устойчивости к изгибу определяют прочность на растяжение в узле или петле. Устойчивость к изгибу характеризуется при этом потерей прочности при растяжении по сравнению с испытанием без перегиба.

Высокая стойкость достаточно толстых комплексных нитей к изгибу обусловлена тем, что они состоят из большого количества (до 750...1000) моноволокон (филаментов) малого диаметра. Характерные диаметры моноволокон баллистических тканей составляют: СВМ – 15 мкм; Русар – 10 мкм; Тварон–микрофиламент, Кевлар–микрофиламент – 9 мкм.

Нити поступают в ткацкое производство для переработки в ткани. Для производства тканей, применяемых в СИБ, используются нити с линейной плотностью 29,4; 58,8 и 100 текс. Ткань получается в результате переплетения двух систем нитей, расположенных относительно друг друга в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Система нитей, идущая вдоль ткани, называется основой, система, перпендикулярная основе, называется утком. По типу переплетения нитей основы и утка ткани разделяются на ткани полотняного, саржевого и атласного (сатинового) переплетений.

Самый плотный тип переплетения – полотняный, в котором каждая нить основы и утка проходят поочередно сверху и снизу пересекающих нитей. Такие ткани обладают максимальной плотностью и прочным закреплением нитей. Среди других типов переплетения у полотняных тканей усилие вытягивания (продергивания) нитей максимально. Из дальнейшего станет ясно, что данное

обстоятельство может отрицательно сказываться на баллистической стойкости тканей полотняного переплетения.

При саржевом переплетении на лицевой стороне ткани преобладают нити одного направления. Саржевое переплетение обозначают дробью, в которой в числителе стоит число перекрытий основы, а в знаменателе – число перекрытий утка со стороны лицевой поверхности. Саржа 1/2, 1/3, 1/4 называется уточной, так как на лицевой стороне преобладают уточные перекрытия, а саржа 2/1, 3/1, 4/1 – основной, так как на лицевой стороне ткани преобладают нити основы. Характерной особенностью тканей саржевого переплетения является наличие на поверхности заметных диагональных полос. Плотность саржевых тканей меньше, чем полотняных, нити обладают более высокой подвижностью, усилие их вытягивания заметно меньше по сравнению с полотняными.

Для изготовления текстильных бронепакетов, соответствующих первому и второму классам стойкости по ГОСТ Р 50744-95, используются ткани как полотняного (например, ткани ТСВМ-ДЖ, артикул 8601) так и саржевого переплетений (ТСВМ-ДЖ, артикул 56319) [2.3].

В атласных и сатиновых переплетениях обычно на лицевой поверхности тканей не менее 5 нитей одного направления приходится на 1 или более нитей другого. Такие ткани имеют гладкую блестящую поверхность. Их особенностью является относительно слабое закрепление нитей в ткани, из-за чего нити легко вытягиваются из ткани и осыпаются по отрезанному краю.

Баллистическая стойкость тканей зависит от степени заполнения ее нитями, которая определяется числом нитей основы $П_о$ и утка $П_у$ на условной длине ткани, равной 10 см. Важную роль играет поверхностная плотность ткани $m_т$ – масса куска ткани единичной площади. При определении поверхностной плотности $m_т$ расчетным путем используют стандартные характеристики: плотности заполнения ткани по основе $П_о$ и утку $П_у$, линейные плотности нитей по основе $\rho_о$ и утку $\rho_у$. С учетом изгиба нитей при их переплетении для расчета $m_т$ можно записать следующее соотношение [2.4]:

$$m_т = 0{,}01\eta_п\left(\rho_о П_о + \rho_у П_у\right), \text{ г/м}^2,$$

где $\eta_п$ – эмпирический коэффициент переплетения, учитывающий извитость нитей в составе ткани.

Прочность ткани на разрыв $P_р$ определяют обычно путем растяжения полоски ткани шириной b = 25 мм (иногда 50 мм), вырезанной из ткани в направлении основы или утка. Для сравнения прочностных характеристик тканей, имеющих различные поверхностные плотности, вводят удельную разрывную нагрузку $P_{уд} = P_р/(bm_т)$. Расчетную разрывную нагрузку, приходящуюся на одну нить в растягиваемой полоске, определяют с помощью соотношения $P_{расч} = P_р/(bП)$, где $П = П_о$ или $П_у$ в зависимости от того, по какому направлению (основе или утку) вырезана полоска ткани.

Удельная работа разрыва (работа на единицу длины) образца ткани $a_р$ определяется путем интегрирования диаграммы деформирования $P = P(\varepsilon)$

$$a_р = \int_0^{\varepsilon_р} P(\varepsilon)d\varepsilon .$$

Если зависимость $P(\varepsilon)$ может быть представлена в виде степенной функции $P = \alpha\varepsilon^n$, то для $a_р$ имеем следующее соотношение

$$a_р = \frac{\alpha\varepsilon_р^{n+1}}{n+1},$$

где α, n – эмпирические постоянные. Для грубых количественных оценок можно пользоваться приближенным соотношением $a_р = 0{,}5P_р\varepsilon_р$.

Прочностные характеристики тканей зависят от скорости деформирования, однако сколько-нибудь устоявшихся данных по этим зависимостям авторам найти не удалось. Выполненные в [2.5] исследования показывают существенное различие поведения при динамическом растяжении индивидуальных нитей и нитей в составе ткани. Кроме этого было установлено, что статическая прочность нитей значительно превосходит динамическую.

Удлинение при растяжении ткани происходит за несколько стадий. На начальной стадии деформирования происходит распрямление нитей ткани, расположенных в направлении нагрузки; растяжение нитей, связанное с уменьшением углов наклона волокон спиральной крутки, распрямление и скольжение волокон. На

конечной стадии деформирования происходит собственно растяжение волокон. Поскольку в тканях полотняного переплетения нити испытывают наибольшее количество перегибов, то при растяжении ткани полотняного переплетения имеют наибольшее удлинение при прочих равных условиях. Однако с увеличением плотности удлинение ткани растет до определенного предела, после которого связанность нитей становится настолько большой, что способность к растяжению уменьшается. Данное обстоятельство необходимо иметь в виду при разработке мягких защитных структур СИБ.

С позиций механики деформируемых тел ткань является ортотропным материалом. Полярная диаграмма зависимости разрывной нагрузки и деформации при растяжении ее в различных направлениях приведена на рис. 2.1 [2.4]. При приложении усилий растяжения под углом к нитям основы и утка прочность ткани ока-

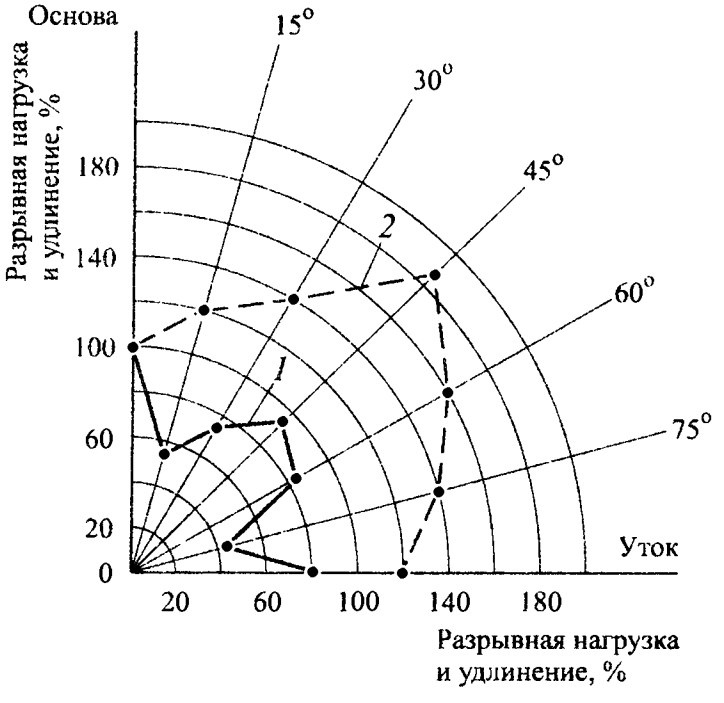


Рис. 2.1. Полярная диаграмма разрывной нагрузки P_P (1) и предельного удлинения ε_P (*2*) ткани при ее растяжении в различных направлениях. Значения P_P и ε_P по основе приняты за 100 %.

зывается меньше, чем при приложении нагрузки в продольном и поперечном направлениях. Деформации удлинения, наоборот, значительно возрастают при промежуточных направлениях приложения нагрузки.

Основные характеристики некоторых баллистических тканей приведены в табл. 2.2. [2.6]

Таблица 2.2

Характеристики отечественных и зарубежных тканей

№ п/п	Тип ткани	Поверхностная плотность $m_т$, г/м^2	Число нитей на 10 см, основа/уток	Разрывная нагрузка, Н основа/уток	Удлинение при растяжен., % основа/уток	Толщина ткани, мм
1	СВМ, арт. 56319	130	222/212	2825/3010	11/11	0,18...0,23
2	СВМ, арт. 56319Р	125	210/210	2090/2100	5/4	0,22
3	СВМ, арт. 8601	186	–	3500/2900	10/6	0,26
4	Терлон	190–200	163/150	2760/4340	~ 11/6	0,25
5	Армос, арт. 5363/11-91	250±20	120/120	2190/2000	6/7	0,25
6	Кевлар 439G	140	–	2380/2390	–	–
7	Кевлар 129	214	–	–	7/5	0,25...0,27
8	Тварон 750	265	–	4020/3810	–	–
9	Тварон 709	190	–	4500/4500	6/5	0,22

ЛИТЕРАТУРА

2.1. Перепелкин К.Е. Современные химические волокна и перспективы их применения в текстильной промышленности. – Рос. химический журнал (Журнал Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2002, т. XLVI, №1.

2.2. Папков С.П. Полимерные волокнистые материалы. М.: Химия, 1986, 224 с.

2.3. Концептуальные основы создания средств индивидуальной защиты. Часть I. Бронежилеты. Под общ. ред. В.Г. Михеева. М.: Межакадемическое изд. «Вооружение. Политика. Конверсия», 2003. – 340 с.
2.4. Бузов Б.А., Алыменкова Н.Д. Материаловедение в производстве изделий легкой промышленности (швейное производство). – М.: Изд. центр «Академия», 2004. – 448 с.
2.5. Рыбин А.А., Летников А.Ю., Сидоров И.И. Экспериментальный анализ механического поведения полимерных нитей в исходном состоянии и в составе тканей при импульсных нагрузках // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – 2001. – Вып. 3(125) – 4(126).
2.6. Григорян В.А., Дашевская О.Б., Чухин Б.Д., Хромушин В.А. Перспективы совершенствования тканевой защиты для создания средств индивидуальной бронезащиты / Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды 3-ей Всероссийской научно–практической конференции в двух томах. Т. 2. С.-Пб, 2000.

Глава 3. МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУЛИ С ТЕКСТИЛЬНОЙ БРОНЕЙ

Как преграда текстильная броня представляет собой сложную дискретную структуру с внутренними степенями свободы, поскольку нити, из которых состоит текстильный бронепакет, обладают способностью к смещению как в направлении воздействия пули, так и в плоскости ткани. Именно способность нитей ткани испытывать смещение при ударно-проникающем воздействии пуль обеспечивает возможность преобразования кинетической энергии пуль в энергию упругого растяжения нитей ткани.

Анализ экспериментов позволяет выделить следующие стадии взаимодействия пули с многослойным текстильным бронепакетом [3.1].

1. Начальная стадия взаимодействия – уплотнение ткани в лицевых слоях пакета, сжатие и ускорение материала в направлении движения пули. Разрушение нитей ткани на этой стадии, иногда называемое раздавливанием, имеет сдвиговой характер. Смещение пробитых слоев ткани невелико. В связи с кратковременностью начальной стадии торможение пули незначительно.

2. Стадия проникания пули в бронепакет с растяжением, вытягиванием и последующим обрывом нитей слоев ткани. Поперечное смещение слоев велико, деформация растяжения нитей превосходит предельную. На этой стадии происходит торможение пули и поглощение части ее кинетической энергии.

3. Стадия торможения пули с образованием тыльного деформационного купола (выпучины) без разрушения слоев ткани. На этой стадии происходит дальнейшее растяжение и вытягивание нитей из ткани. Совместно с работой деформации материала подложки эти процессы поглощают оставшуюся часть кинетической энергии пули и останавливают ее.

Этим стадиям соответствуют структура текстильного бронепакета, приведенная на рис. 3.1, в которой слои ткани, соответствующие различным стадиям, пространственно разнесены.

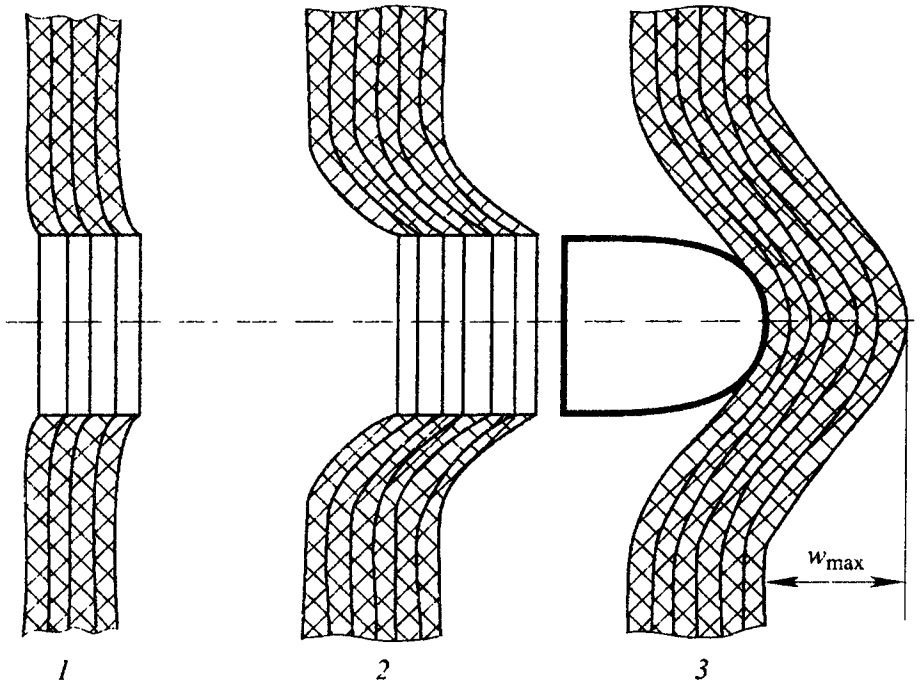


Рис. 3.1. Структура текстильного бронепакета после торможения пули: *1* – лицевые слои бронепакета; *2* – срединные слои бронепакета; *3* – тыльные слои бронепакета

3.1. Начальная стадия взаимодействия пули с текстильной броней

На начальной стадии ударного взаимодействия пули с текстильным пакетом в нем возникает волна сжатия, в которой происходит вовлечение в поперечное движение слоев ткани. Для оценки амплитуды этой волны необходимо знать характеристики динамической сжимаемости пакета, который представляет собой пористый материал, состоящий из полимерных нитей и воздуха. В механике пористых материалов в качестве характеристики пористости часто используют коэффициент μ, равный отношению объема пор $V_{пор}$ к объему образца V_0

$$\mu = \frac{V_{пор}}{V_0} = \frac{V_0 - V_м}{V_0} = 1 - \frac{V_м}{V_0} = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_м} = 1 - K_V,$$

где $V_м$ и $\rho_м$ – объем и плотность полимера; ρ_0 – плотность пакета, K_V – используемый в текстильном материаловедении коэффициент объемности. Пористость текстильного пакета в соответствии с его строением имеет три уровня: внутринитяная пористость, пористость единичного слоя ткани и межслойная пористость. Оценим по порядку величины коэффициенты μ каждого уровня.

Комплексная нить образуется из множества волокон. Плотность заполнения нити волокнами зависит от плотности их укладки в контуре поперечного сечения нити. Полагая, что поперечные сечения волокон представляют собой круги одного и того же диаметра, и, исходя из геометрических соображений, можно получить следующие оценки для максимального $\mu_{нmax}$ (квадратная укладка волокон) и минимального $\mu_{нmin}$ (гексогональная укладка волокон) значений внутринитяной пористости

$$\mu_{н\,max} = 1 - \frac{\pi}{4} \approx 0{,}21, \quad \mu_{н\,min} = 1 - \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \approx 0{,}093.$$

Реальное значение пористости будет соответствовать некоторому среднему значению $\mu_н = 0,\ 15\ldots0{,}17$.

Пористость слоя зависит от типа ткани. Полагая, что слой ткани образуется плотной укладкой нитей двух ортогональных семейств основы и утка, можно получить ту же оценку пористости слоя ткани $\mu_с = 0{,}15\ldots017$.

Используя для оценки межслойной пористости тот же подход, получим ту же оценку межслойной пористости текстильного пакета $\mu_п = 0{,}15\ldots017$.

Итоговая пористость текстильного пакета будет равна сумме пористостей всех уровней $\mu = \mu_н + \mu_с - \mu_п = 0{,}45\ldots0{,}51$, что, примерно, соответствует пористости нитей в бобине. Реальная пористость текстильного пакета может быть несколько выше и составлять 0,5…0,6.

Для оценки амплитуды волны сжатия, возникающей в текстильном пакете в начальный момент ударного взаимодействия, предположим, что во фронте этой волны происходит уплотнение пакета до сплошного состояния, то есть, плотность скачком изме-

няется от начального значения ρ_0 до плотности полимера, из которого изготовлена ткань $\rho_м$. Применяя законы сохранения массы и импульса для начального и конечного состояний пакета, получим

$$\rho_0 D = \rho_м (D - u),$$

$$p = \rho_0 u D,$$

где D – скорость фронта волны сжатия; p, u – давление и массовая скорость за фронтом волны. Из этих законов сохранения следуют соотношения для волновой скорости D и давления p

$$D = \frac{u}{\mu}, \quad p = \frac{\rho_0 u^2}{\mu}.$$

Оценим давление, возникающее при ударе пули пистолета ПМ ($v_п$ = 330 м/с) по текстильному пакету из ткани с пористостью μ = 0,6. Пусть основой ткани являются полиарамидные волокна с плотностью $\rho_м$ = 1,44 г/см^3. Поскольку $\rho_0 = (1-\mu)\rho_m$, то ρ_0 = 0,576 г/см^3. Пренебрегая сжимаемостью материала пули по сравнению со сжимаемостью текстильного пакета, получим: $u = v_п$, D = 550 м/с, p = 0,105 ГПа.

Прочность современных полиарамидных нитей на растяжение составляет $\sigma_р$ = 3,0...4,5 ГПа, поэтому возникающее давление оказывается порядка 3% от $\sigma_р$. По данным, приведенным в книге [3.2], поперечная прочность параарамидных волокон на сжатие $\sigma_{сж}$ составляет всего 1,0...1,5% от прочности на растяжение, поэтому волокна в зоне высокого давления, возникающей при ударе пули, окажутся разрушенными вследствие «раздавливания». Каковы же размеры этой зоны?

При воздействии цилиндрического ударника с плоским торцом зона высокого давления совпадает с областью одномерного сжатия. В лицевых слоях ткани размер зоны высокого давления совпадает с диаметром ударника. В последующих слоях вследствие распространения в сжатую область боковых волн разгрузки диаметр зоны высокого давления быстро уменьшается и на глубине, равной примерно радиусу ударника, волны разгрузки смыкаются на оси симметрии ударного взаимодействия. Уплотненная в зоне высокого давления часть текстильного бронепакета, находящаяся непосредственно под ударником, вследствие сдвига относительно всего

бронепакета отделяется от него и присоединяется к плоскому торцу, образуя удобообтекаемую присоединенную массу (рис. 3.2 *а*).

При воздействии пуль с полусферическим торцом зона высокого давления в лицевом слое ткани ограничена радиусом отрыва поперечной волны в нитях ткани от поверхности головной части пули. Как известно, при поперечном ударе по нити в ней начинают распространяться продольные и поперечные волны (см. следующий раздел). Схема взаимодействия пули с полусферической головной частью с нитью приведена на рис. 3.2 *б*.

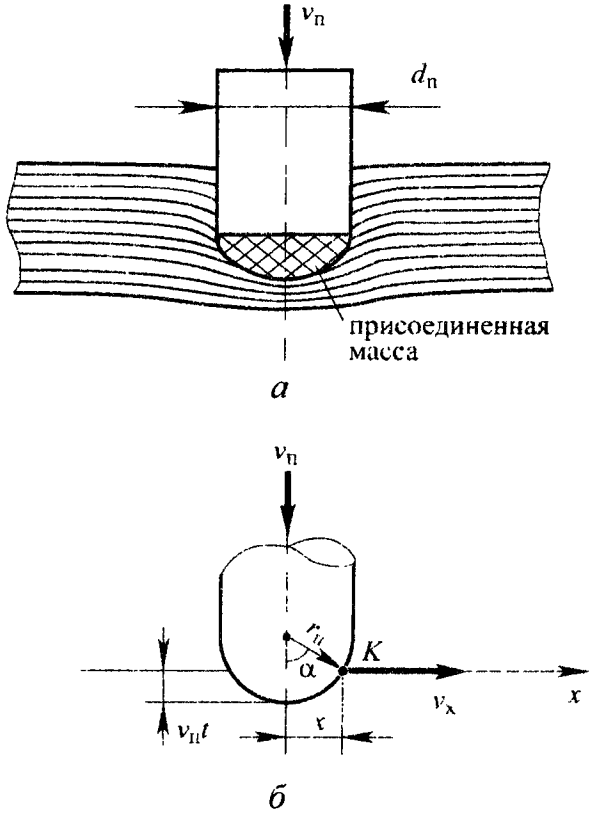


Рис. 3.2. Начальная стадия взаимодействия ударника с плоским торцом с текстильным бронепакетом (*а*), и ударника с полусферической головной частью с нитью (*б*).

Скорость перемещения крайних точек контакта головной части пули с прямолинейной нитью, расположенной вдоль оси *x*, равна

$$\frac{dx}{dt} = v_x = v_п \frac{r_п - v_п t}{\sqrt{r_п^2 - (r_п - v_п t)^2}},$$

где $r_п$ – радиус пули. В начальный момент времени эта скорость велика: при $x \to 0$, $v_x \to \infty$. При внедрении пули на высоту головной части она стремится к нулю: при $x \to r_п$, $v_x \to 0$. Обозначим радиус пятна контакта, при котором скорость v_x достигнет некоторого значения a, через r_a. Из геометрических соображений нетрудно получить соотношение:

$$\frac{r_a}{r_п} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{a^2}{v_п^2}}}.$$

При a, равной скорости продольной волны с = 8000 м/с и $v_п$ = 315 м/с, радиус зоны, из которой не может выйти продольная волна, мал и составляет

$$r_a \approx \frac{v_п}{c} r_п = 0{,}045 r_п.$$

При a, равной скорости поперечной волны b = 500...600 м/с, радиус пятна контакта составит: для пули пистолета ПМ $r_a \cong 0{,}45 r_п$ = 2,1 мм для шарика с $v_п$ = 500...600 м/с и $r_п$ = 3 мм $r_a \cong 0{,}71 r_п$ = 2,1 мм. В обоих случаях диаметр пятна контакта оказывается равным ~ 4,2 мм. Измеренный диаметр области разрушения в бронепакетах из ткани арт. 56319 колеблется в пределах 3,5...4,5 мм, что соответствует теоретической оценке.

Время t_a, за которое радиус зоны контакта достигнет величины r_a, может быть определено с помощью соотношения

$$t_a = \frac{r_п}{v_п}\left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r_a}{r_п}\right)^2}\right).$$

Смещение пули y_a в этот момент времени будет равно

$$y_a = v_п t_a = r_п\left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r_a}{r_п}\right)^2}\right),$$

Для пули пистолета ПМ и $r_a \cong 0{,}45 r_п$: $t_a \cong 1{,}46$ мкс и $y_a \cong 0{,}1 r_п \cong$ 0,45 мм. Волна сжатия в пакете за время t_a переместится на глубину

0,8 мм, вдоль нитей продольная волна растяжения распространится примерно на 10 мм от оси ударного взаимодействия. Таким образом, начальная волновая стадия взаимодействия пули пистолета ПМ проявляется в течение очень короткого времени и затрагивает не более 2...3 слоев ткани текстильного бронепакета.

По истечении времени t_a поперечная волна отрывается от крайней точки контакта пули со слоем ткани, и нити ткани начинают вовлекаться в поперечное движение, а распространяющаяся в нитях продольная волна растяжения поставляет материал в очаг деформации. Из-за дискретной структуры текстильного пакета амплитуда волны сжатия быстро убывает, но остается достаточной для формирования очага деформации.

На начальной стадии взаимодействия нити ткани, облегая поверхность полусферической головной части пули, кроме сжатия подвергаются растяжению. Максимальная деформация растяжения нитей $\varepsilon_р$, пересекающих ось симметрии ударного взаимодействия, на начальной стадии может быть определена из соотношения (рис. 3.2)

$$\varepsilon_р = \frac{r_п\alpha - r_п \sin\alpha}{r_п \sin\alpha} = \frac{\alpha - \sin\alpha}{\sin\alpha}.$$

Начальная стадия деформирования характеризуется малыми значениями угла α, для которых справедливы приближенные соотношения

$$\sin\alpha \approx \alpha - \alpha^3/6; \quad \cos\alpha \approx 1 - \alpha^2/2.$$

С учетом того, что

$$\cos\alpha = (r_п - v_п t)/r_п,$$

получим следующее соотношение для $\varepsilon_р$

$$\varepsilon_р \approx \frac{v_п t}{3r_п}.$$

Из этой формулы следует, что деформация растяжения нитей на оси симметрии растет пропорционально перемещению пули и обратно пропорционально радиусу ее головной части. В определенной степени эта формула может объяснить так называемое «режущее» действие острых ребер и кромок ударников, характеризующихся малыми радиусами кривизны. Так, например, при $r_п$ = 0,5...1,0 мм и $\varepsilon_р$ = 3 % разрыв нити произойдет при перемещении

пули на 0,045...0,09 мм. При скорости ударника 450 м/с (0,45 мм/мкс) на это потребуется всего 0,1...0,2 мкс. Но если традиционное резание осуществляется, в основном, при локализованном сдвиге одной части материала относительно другой его части, то в рассматриваемом случае резание осуществляется за счет локализованного вдоль режущей кромки растяжения и последующего разрыва нитей ткани.

Острыми кромками и ребрами обладают не только осколки естественного дробления, но и поражающие элементы в форме кубиков, цилиндров с плоскими торцами. Кроме этого, острой кромкой обладает сердечник пули Пст к пистолету ТТ с головной частью в форме усеченного конуса. Эффект режущего действия проявляется на начальной стадии взаимодействия ударников и пуль с текстильным бронепакетом и уменьшает его баллистическую стойкость за счет уменьшения числа слоев ткани, формирующих силу торможения на последующих стадиях проникания и торможения.

Силу сопротивления прониканию пули на первой стадии можно записать в виде классического двучленного выражения

$$F = S\left(A\sigma_{c.ж} + B\rho_0 v^2\right),$$

в котором S – площадь миделевого сечения пули, A и B – коэффициенты, зависящие от геометрии головной части пули и свойств материала пакета.

3.2. Стадии проникания и торможения пули

На второй и третьей стадиях взаимодействия пули с текстильным пакетом вследствие смещения слоев ткани сопротивление прониканию ударника осуществляется силами натяжения нитей. С позиций механики композиционных материалов текстильный бронепакет представляет собой ортотропную систему из переплетенных по определенным правилам нитей. Для более полного понимания механики взаимодействия пули с такой системой рассмотрим задачу о поперечном ударе по линейной и нелинейной нитям. Наиболее полное исследование этих задач выполнено Х.А. Рахматуллиным и его учениками [3.3]. Следуя в основном работам [3.3, 3.4], рассмотрим в кратчайшем виде основные моменты решения простейших задач о поперечном ударе по нити. Нить – это одномерная

структура, оказывающая сопротивление только изменению своей длины и не оказывающая сопротивление изгибу. Суммарное значение напряжений, действующих в поперечном сечении нити, называют натяжением. Натяжение направлено по касательной к нити.

3.2.1. Линейное уравнение движения нити.

Пусть до начала движения однородная нить с линейной плотностью ρ растянута вдоль координатной оси x декартовой координатной системы x, y. Начальную силу натяжения нити обозначим через T. Предполагается, что при движении все точки смещаются в плоскости x, y перпендикулярно оси x. Обозначим угол между касательной к нити и осью x через φ. Смещение точек нити (прогиб) $w(x, t)$ считаем малыми (рис. 3.3), так что

$$\varphi << 1, \quad \sin\varphi \approx \operatorname{tg}\varphi = \frac{\partial w}{\partial x}.$$

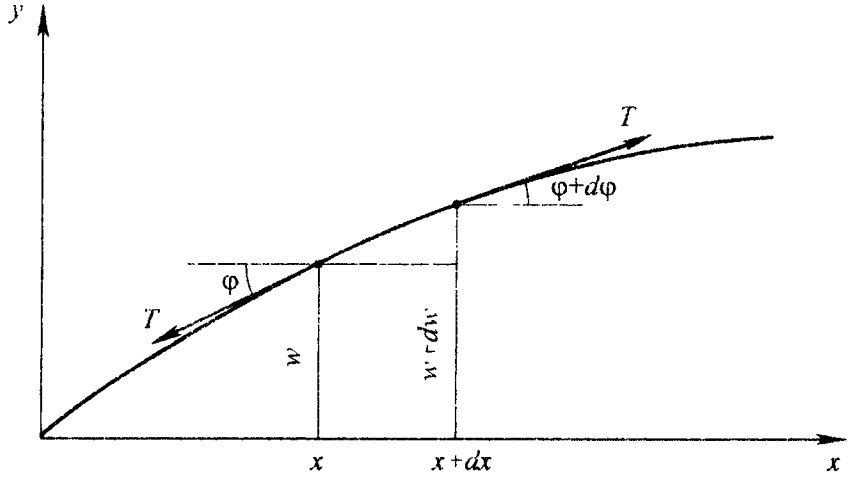


Рис. 3.3. К выводу линейного уравнения движения нити с постоянной силой натяжения

Как следует из рис. 3.3, уравнение движения элемента нити длиной dx вдоль оси y имеет вид

$$\rho \cdot dx \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial \left(T \sin\varphi\right)}{\partial x} \cdot dx,$$

где $T\sin\varphi$ – вертикальная составляющая силы натяжения. Так как сила натяжения зависит от удлинения, а в силу принятых ограни-

чений удлинением нити можно пренебречь, то сила натяжения T также постоянна и уравнение движения нити принимает вид

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad c^2 = \frac{T}{\rho},$$

где c – скорость распространения поперечной волны в нити. Это волновое уравнение, его решение для волны одного направления имеет вид

$$w(x,t) = w(ct - x).$$

Вид функции $w(x, t)$ определяется из краевых условий. Если на нить действует распределенная нормальная внешняя сила с интенсивностью $q(x, t)$, то уравнение движения примет вид

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + q(x,t).$$

3.2.2. Задача об ударе по нити с постоянной силой натяжения.

Пусть в момент времени $t = 0$ в точке $x = 0$ по покоящейся нити, растянутой с силой натяжения T_0 вдоль оси x, производится нормальный удар телом массы M с начальной скоростью v_0. Нужно найти закон движения тела.

Конфигурация деформирующейся нити приведена на рис. 3.4. Начальные условия задачи имеют вид:

$$t \le 0, \quad |x| \le \infty, \quad w = \partial w/\partial t = 0; \quad t = +0, \quad x = 0, \quad \partial w/\partial t = v_0.$$

При $t > 0$ граничное условие в точке $x = 0$ представляет собой уравнение движения тела, которое имеет вид (рис. 3.4)

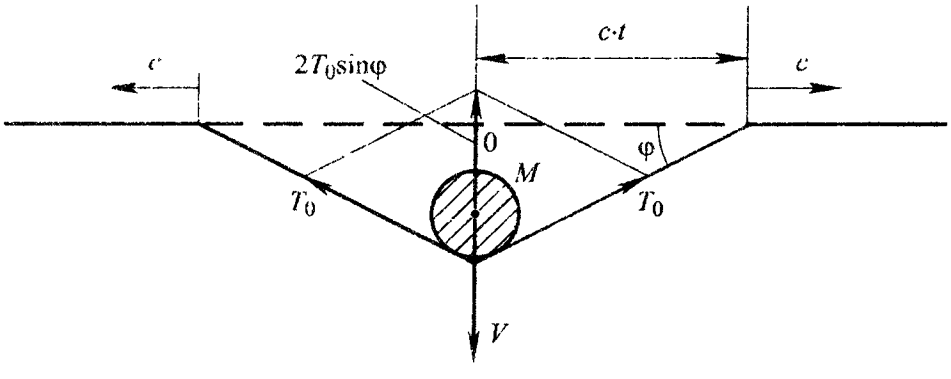


Рис. 3.4. Схема удара по нити с постоянной силой натяжения

$$M \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 2 \cdot T_0 \cdot \sin \varphi$$

Введем обозначение $z = ct - x$, тогда в точке $x = 0$ $w(0,t) = w(z)$. С учетом сделанной замены справедливы соотношения

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial x} = -\frac{\partial w}{\partial z} = \sin\varphi;$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}.$$

С учетом этих соотношений уравнение движения принимает вид

$$M \cdot c^2 \cdot \frac{d^2 w}{dz^2} + 2T_0 \cdot \frac{dw}{dz} = 0$$

Решение этого дифференциального уравнения может быть найдено стандартным способом. Составляем и решаем характеристическое уравнение для дифференциального уравнения

$$\lambda^2 + \frac{2T_0}{M \cdot c^2}\lambda = 0, \quad \lambda_1 = 0, \quad \lambda_2 = -\frac{2T_0}{Mc^2},$$

где λ_1, λ_2 – корни характеристического уравнения. Общее решение дифференциального уравнения движения записывается следующим образом

$$w(z) = C_1 + C_2 \cdot e^{\frac{2T_0}{Mc^2} z}$$

Значения постоянных C_1 и C_2 определяются из начальных условий: $z = 0$, $w=0$, $dw/dz = v_0/c$. В итоге получаем

$$w(z) = \frac{M \cdot c \cdot v_0}{2T_0} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot T_0}{M \cdot c^2} z}\right).$$

После подстановки $z = ct$ закон торможения тела принимает вид.

$$w(t) = \frac{M \cdot c \cdot v_0}{2T_0} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2T_0}{Mc} t}\right).$$

Полная остановка тела происходит при смещении нити на величину

$$w(\infty) = \frac{M \cdot c \cdot v_0}{2T_0}.$$

Смещение точек нити (форма поперечной волны) описывается соотношением

$$w(x,t)=\frac{M\cdot c\cdot v_0}{2T_0}\cdot\left(1-e^{-\frac{2\cdot T_0}{M\,c^2}(ct-x)}\right).$$

3.2.3. Нелинейная модель движения нити.

Без упрощающих предположений о малости смещений и деформаций уравнения движения нити оказываются нелинейными [3.3]. Анализ этих уравнений показывает, что в нитях возможно распространение двух типов волн: продольных и поперечных.

В продольной волне скорость движения элементов нити направлена вдоль нити и противоположно направлению волновой скорости в волнах растяжения и совпадает по направлению – в волнах разгрузки. Скорость продольной волны c определяется соотношением

$$c=\sqrt{\frac{1}{\rho}\cdot\frac{d\sigma}{d\varepsilon}},$$

где ρ – плотность материала нити, а производная $d\sigma/d\varepsilon$ вычисляется вдоль диаграммы растяжения нити $\sigma = \sigma(\varepsilon)$. Для упругой нити $\sigma = E\varepsilon$ (E – модуль упругости)

$$c=\sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

В продольной волне выполняются следующие соотношения:

$$-\sigma=\rho_0\cdot c\cdot u,\quad \sigma=\rho_0\cdot c^2\cdot\varepsilon,\quad u=-c\cdot\varepsilon,\quad \rho_0\cdot c=\rho\cdot(c-u),$$

где u – массовая скорость продольного движения нити.

В поперечной волне скачкообразно изменяется направление движения нити – элементы нити приобретают поперечную составляющую скорости v, направленную перпендикулярно нити. Поскольку нить не сопротивляется изгибу, то во фронте поперечной волны напряжения и деформации не испытывают разрыв. Напряжение в нити создает продольная волна. Для вывода соотношений, связывающих характеристики движения нити на фронте поперечной волны, зададимся конфигурацией движения, приведенной на рис. 3.5. За точкой A, являющейся фронтом поперечной волны, нить изменяет направление движения. Пусть скорость фронта про-

дольной волны равна b, тогда за единицу времени через точку A пройдет элемент нити длиной $b + u$, массой $\frac{\rho_0}{1+\varepsilon}(b+u)$, имеющий импульс, направленный по оси x, $\frac{\rho_0 u}{1+\varepsilon}(b+u)$. За точкой A горизонтальная составляющая импульса исчезает под действием горизонтальной составляющей силы натяжения $T(1-\cos\varphi)$. Исходя из закона сохранения импульса, можно записать

$$\frac{\rho_0 u}{1+\varepsilon}(b+u) = T(1-\cos\varphi).$$

Под действием вертикальной составляющей силы натяжения $T\sin\varphi$ этот же элемент нити приобретает импульс, направленный вдоль оси y

$$\frac{\rho_0 v}{1+\varepsilon}(b+u) = T\sin\varphi,$$

где v – скорость поперечного смещения нити. Привлекая геометрическое соотношение $b = v\,\mathrm{tg}\varphi$, из полученных выражений можно исключить v и получить взаимосвязь скорости движения фронта поперечной волны относительно частиц перед ее фронтом

$$b + u = \sqrt{\frac{T(1+\varepsilon)}{\rho_0}}.$$

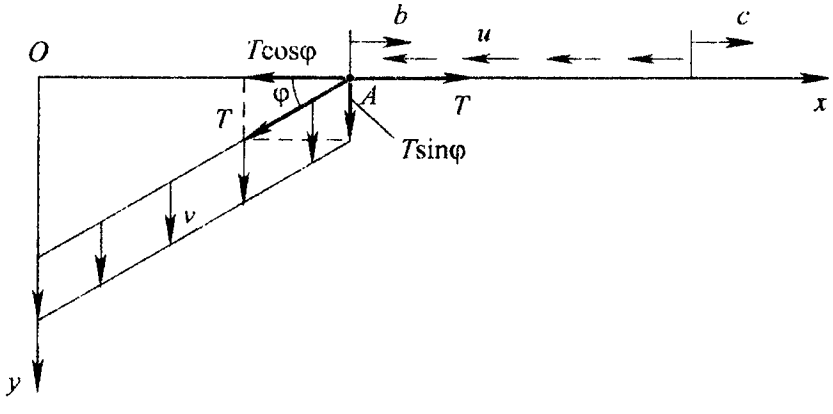


Рис. 3.5. Распространение в нити продольной (c) и поперечной (b) волн

Для упругой нити из этого уравнения не представляет труда получить соотношения для скорости поперечной волны:
– относительно ускоренных продольной волной частиц нити

$$b_1 = c \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}},$$

– относительно неподвижной точки на нити (т. O, см. рис. 3.5)

$$b_0 = c \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot (1+\varepsilon)} - c \cdot \varepsilon.$$

Для приближенных оценок при малых деформациях можно считать, что $b_0 \approx b_1 \approx c\sqrt{\varepsilon} \approx \sqrt{\frac{T}{\rho_0}}$.

3.2.4. Задача об ударе по нелинейной нити с постоянной скоростью.

Пусть в момент времени $t = 0$ точка $x = 0$ ненапряженной нити, расположенной вдоль оси x, получает постоянную скорость v_0. Нужно определить движение нити при $t > 0$ и возникающую силу сопротивления деформированию нити.

После удара в нити начинают распространяться продольные и поперечные волны. Конфигурация деформирующейся нити приведена на рис. 3.6.

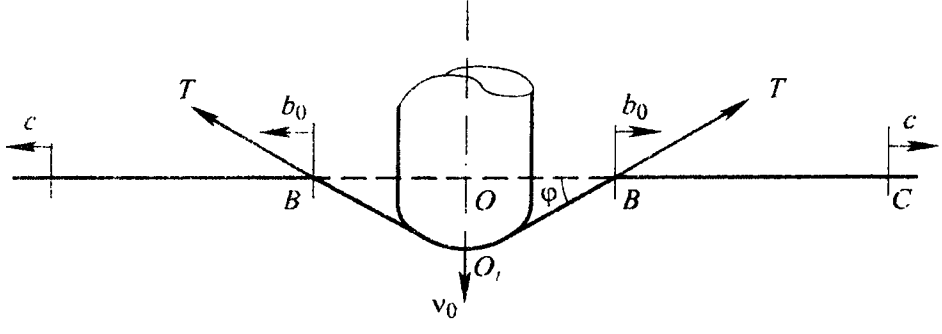


Рис. 3.6. Конфигурация деформирования нити при поперечном ударе с постоянной скоростью

Эта задача автомодельная (нет параметра с размерностью длины). Для определения силы натяжения нити необходимо определить взаимосвязь между v_0, b_0, φ и ε. Из рис. 3.6 следует, что деформация удлинения нити равна

$$\varepsilon = \frac{O_1BC - OC}{OC} = \frac{\sqrt{b_0^2 + v_0^2} - b_0}{c}.$$

Удлинение, приобретаемое нитью во фронте продольной волны, расходуется на образование выступа BO_1B. Подставив в это соотношение выражение для скорости поперечной волны b_0, получим зависимость между скоростью v_0 и деформацией ε

$$\frac{v_0}{c} = \sqrt{2 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot (1 + \varepsilon)} - \varepsilon^2}\ .$$

При $\varepsilon < 0{,}1$ эта зависимость хорошо аппроксимируется формулой [3.3]:

$$\frac{v_0}{c} \approx \left(\frac{\varepsilon}{0{,}63}\right)^{\frac{3}{4}}.$$

При отсутствии начальных натяжений и малых деформациях нити с помощью полученных соотношений можно получить следующие приближенные зависимости [3.3]

$$\varepsilon \approx 0{,}63\left(\frac{v}{c}\right)^{\frac{4}{3}}, \quad b_0 \approx 0{,}8 v^{\frac{2}{3}} c^{\frac{1}{3}}, \quad \operatorname{tg}\varphi \approx 1{,}25\left(\frac{v}{c}\right)^{\frac{1}{3}}. \qquad (3.1)$$

Сила сопротивления поперечному смещению отдельной нити F_1 определяется как векторная сумма сил натяжения T (рис. 3.5)

$$F_1 = 2 \cdot T \cdot \sin\varphi = 2E\varepsilon s \sin\varphi, \qquad (3.2)$$

где s – площадь поперечного сечения нити, заполненная материалом нити. Деформирование (растяжение) нити осуществляется в упругой продольной, а ее поперечное смещение – в поперечной волнах, распространяющихся в нити от места удара. При малых деформациях, силу сопротивления единичной нити с достаточной точностью можно определить с помощью соотношения

$$F_1 \approx 1{,}6 \cdot E s \left(\frac{v_0}{c}\right)^{\frac{5}{3}}, \qquad (3.3)$$

полученного из (3.2) подстановкой приближенных зависимостей для ε и φ.

Полученные выше соотношения справедливы лишь в том случае, когда масса ударяющего тела бесконечно велика, вследствие чего скорость тела остается постоянной. При ударе телом конечной

массы его скорость в процессе ударного взаимодействия уменьшается, поскольку возникшее в результате удара натяжение нити тормозит тело. Вследствие этого конфигурация нити в поперечной волне будет криволинейной и вычисление силы сопротивления значительно усложняется. Приближенное аналитическое решение задачи об ударе по нелинейной нити телом конечной массы приведено в [3.3].

3.2.5. Схема деформирования единичного слоя ткани; проникание пули в бронепакет; эквивалентные нити.

Схема деформирования нитей в единичном слое ткани приведена на рис. 3.7. Вследствие взаимного влияния друг на друга об-

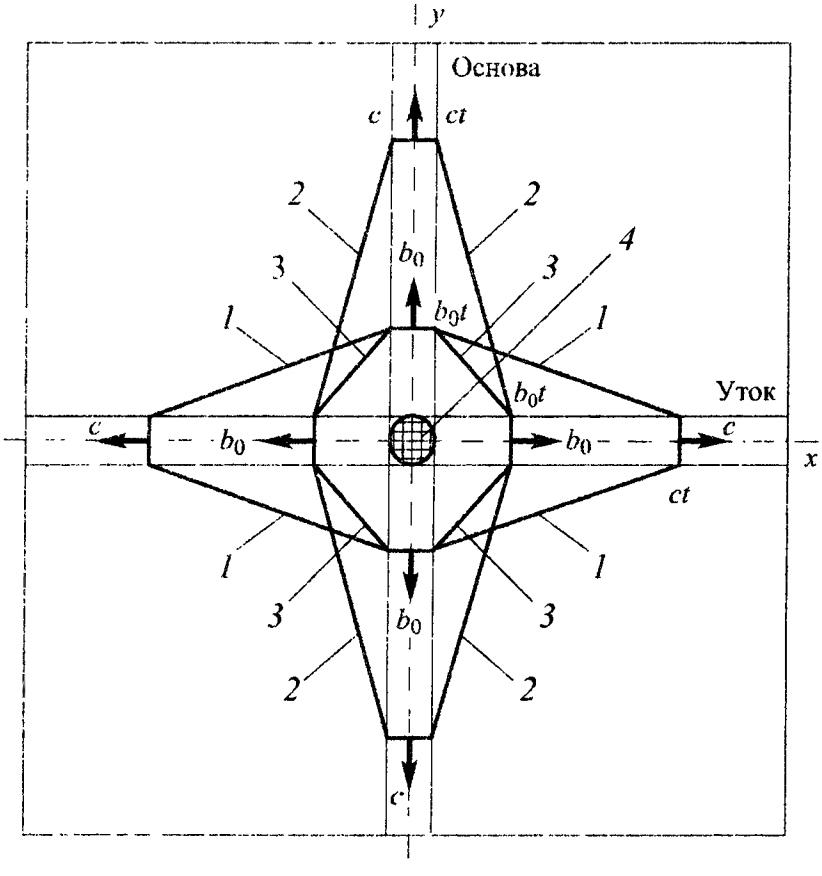


Рис. 3.7. Схема распространения волн в слое ткани при поперечном ударе: 1 – фронты продольных волн в нитях утка; 2 – фронты продольных волн в нитях основы; 3 – фронты поперечных волн, 4 – область воздействия.

ласть вовлеченных в движение нитей со временем увеличивается. Поверхность деформированной области ткани приобретает пирамидальную форму. При вычислении силы торможения пули хорошее приближение дает общепринятое предположение, согласно которому основной вклад в суммарную силу сопротивления дают нити, проходящие непосредственно через область воздействия (модель «крест–колокол» [3.1]). Пусть радиус области воздействия ра вен R, тогда суммарное число нитей $n_н$, проходящих через круговую область радиуса R, будет равно

$$n_н = \frac{2Rm_т}{\rho_м s},$$

где $m_т$ – поверхностная плотность одного слоя ткани. Суммарная сила сопротивления $n_н$ нитей с учетом того, что $E = \rho_м c^2$, будет равна

$$F_n = n_н F_1 = 2n_н E \varepsilon s \sin\varphi \approx 3{,}2 v_0^{\frac{5}{3}} c^{\frac{1}{3}} m_т R \qquad (3.4)$$

Полученное соотношение для определения силы сопротивления справедливо для удара с постоянной скоростью по слою ткани бесконечной протяженности. Пуля при проникании в бронепакет движется с переменной скоростью, изменяющейся от начальной v_0 до 0, поэтому соотношение (3.4), строго говоря, может быть использовано только для определения начальной силы сопротивления. Но так как скорость удара пуль и осколков v_0 = 300...500 м/с значительно меньше скорости продольных волн в нитях с = 8000...10000 м/с, то можно предположить, что напряженно-деформированное состояние нитей будет успевать подстраиваться к изменению скорости пули. Тогда соотношение (3.4) можно использовать для приближенного определения силы торможения пули при взаимодействии с тканевым пакетом. Для этого тканевый пакет обычно заменяют скрещенными эквивалентными нитями с площадью поперечного сечения $S = 2R \times h$ (h – толщина текстильного пакета), а скорость поперечного смещения ткани считают переменной. При сделанных предположениях торможение ударника описывается уравнением

$$(m + M_{тп})\frac{dv}{dt} = 2n_{н} nE\,\varepsilon s \sin\varphi \approx 3{,}2 v^{\frac{5}{3}} c^{\frac{1}{3}} m_{тп} R,$$

где m – масса пули; $M_{тп}$ – присоединенная масса текстильного бронепакета, вовлекаемого в движение вместе с пулей; n– число слоев ткани; $m_{тп}$ – поверхностная плотность бронепакета. Интегрирование этого уравнения приводит к следующим зависимостям скорости v и прогиба w от времени

$$v = \left(v_1^{-2/3} + \lambda t \right)^{-3/2},$$

$$w = \frac{2v_1^{1/3}}{\lambda} - \frac{2}{\lambda}\left(v_1^{-2/3} + \lambda t \right)^{-1/2},$$

где $\lambda = 2{,}13 c^{1/3} m_{тп} R/(m + M_{тп})$; $v_1 = m v_0/(m + M_{тп})$ – начальная скорость, с которой начинает двигаться пуля с присоединенной массой ткани. Количественный анализ полученных соотношений показывает, что развивающиеся в бронепакете прогибы превосходят наблюдаемые в экспериментах, что свидетельствует о необходимости уточнения модели.

При малых прогибах текстильного пакета деформация удлинения нитей ε в первом приближении пропорциональна квадрату максимального прогиба w

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{w^2 + r_{пв}^2} - r_{пв}}{r_{пв}} \approx \frac{1}{2}\left(\frac{w}{r_{пв}} \right)^2,$$

где $r_{пв}$ – радиус зоны, охваченной поперечной волной. Используя для силы торможения F_1 соотношение (3.2) и приближенное равенство $\sin\varphi \approx w/r_{пв}$, получим, что сила торможения, создаваемая единичной нитью, пропорциональна кубу максимального прогиба нити

$$F_1 = 2E\varepsilon s \sin\varphi = Es\left(\frac{w}{r_{пв}} \right)^3.$$

Для силы сопротивления всего бронепакета, вычисляемой по модели скрещенных эквивалентных нитей, нетрудно получить выражение

$$F_п = n_н F_1 \approx 2R m_{тп} c^2 \left(\frac{w}{r_{пв}} \right)^3.$$

Таким образом, сила сопротивления прониканию пули оказывается пропорциональной кубу прогиба. Чтобы использовать это выражение для расчета зависимостей скорости и перемещения пули от

времени, необходимо знать как изменяется со временем радиус зоны $r_{пв}$, охваченной поперечной волной.

В работе [3.5] для определения силы торможения пули вместо модели скрещенных эквивалентных нитей используется более реалистичная пирамидальная форма деформированной поверхности бронепакета, описываемая уравнением

$$u(x,y) = u_{max}\left(1 - \sqrt{(x/r_{пв})^{4/3} + (y/r_{пв})^{4/3}}\right).$$

Этому уравнению деформированной поверхности соответствует сила торможения, равная

$$F = \frac{8}{9}\frac{Em_{тп}}{\rho_м}\frac{w^3}{r_{пв}^2} = \frac{8}{9}m_{тп}c^2\frac{w^3}{r_{пв}^2}. \qquad (3.5)$$

При получении этого соотношения в [3.5] предполагалось, что нити в составе ткани не проскальзывают относительно друг друга.

В уравнении движения пули в [3.5] учитывают присоединенную массу участка бронепакета $M_{тп}$, движущегосяя вместе с пулей

$$(m + M_{тп})\frac{dv}{dt} = -\frac{8}{9}m_{тп}c^2\left(\frac{w}{r_{пв}}\right)^2 w.$$

При интегрировании этого уравнения производную от скорости по времени заменяют производной по перемещению $dv/dt = v\,dv/dw$, а в качестве начального значения скорости используют значение $v_1 = mv_0/(m + M_{тп})$, получаемое из закона сохранения импульса для неупругого соударения пули с присоединенной массой бронепакета. Кроме этого полагают, что в процессе торможения пули отношение $w/r_{пв}$ остается постоянным, т.е. при развитии прогиба форма деформированной поверхности остается самоподобной, что справедливо, вообще говоря, только для удара с постоянной скоростью. Однако в [3.5] утверждается, что самоподобие роста тыльного деформационного купола имеет экспериментальное подтверждение.

Так как предельной скорости пробития $v_{псп}$ соответствует предельная деформация удлинения нитей $\varepsilon_р$, то интегрирование приведенного выше уравнения движения приводит к следующему соотношению для определения предельной скорости пробития текстильного бронепакета:

$$v_{\text{псп}} = \frac{9}{2}(1+\beta_S X)c\varepsilon_{\text{р}}\psi(z),$$

где $X = \pi R^2 m_{\text{тп}}/m$ – отношение массы участка текстильного бронепакета под пулей, имеющей радиус R, к массе пули; $\psi(z) = (z^2 - 2z + 3)^{-1}$; $z = \left(\dfrac{9\pi(1+\beta_S X)}{8X}\right)^{1/6}$; β_S – коэффициент, учитывающий увеличение площади участка пакета, вовлекаемого в движение, по сравнению с площадью поперечного сечения пули. Обработка экспериментальных данных с помощью соотношения $M_{\text{тп}} = \beta_S \pi R^2 m_{\text{тп}}$ дает значение $\beta_S = (1{,}6)^2 = 2{,}56$ [3.6].

В работе [3.7] для анализа взаимодействия пули с текстильным бронепакетом разработана мембранная модель, согласно которой каждый слой ткани представляется плоской изотропной упругой мембраной. Модель позволяет анализировать бронепакеты, состоящие из разных тканей, которые располагаются относительно друг друга без зазора или с зазором.

Прогиб w круглой мембраны радиусом r_0, защемленной по контуру, под действием сосредоточенной силы F, приложенной в центре, может быть определен из кубического уравнения [3.8]

$$\frac{w}{h} + A\left(\frac{w}{h}\right)^3 = B\frac{F r_0^2}{E h^4},$$

где A = 0,272 и B = 0,552 – постоянные, зависящие от граничных условий; h – толщина мембраны. При больших прогибах линейным членом в правой части соотношения можно пренебречь и тогда получается следующее соотношение, связывающее силу F и прогиб в центре мембраны $w_{\max}$

$$F = \frac{A}{B} m_{\text{пм}} c^2 \frac{w^3}{r_0^2},$$

где $m_{\text{пм}} = \rho_{\text{м}} h$ – поверхностная плотность мембраны. С точностью до численного множителя эта формула совпадает с формулой (3.5) для силы сопротивления движению пули при взаимодействии с текстильным бронепакетом, полученной в работе [3.5].

Нити тех слоев ткани, для которых деформация удлинения ε превысит предельную ε_p, будут разрушены (вторая стадия). Часть кинетической энергии пули будет затрачена на разрушение определенного количества слоев ткани, в результате чего скорость пули уменьшится до безопасной величины

$$v_p = 1{,}41 c \varepsilon_p^{\frac{3}{4}}.$$

При c = 9000 м/с, ε_p = 3 % получим v_p = 380 м/с, так что поверхностные слои большинства баллистических тканей из параарамидных волокон при воздействии сферических поражающих элементов со скоростью v_0 = 500...600 м/с и пуль пистолета ТТ v_0 = 415...445 м/с разрушаются не только из-за раздавливания, но и из-за превышения предельной деформации удлинения. Для сверхвысокопрочных полиэтиленовых волокон (Спектра, Дайнема, Текмилон) значение безопасной скорости ударного воздействия несколько выше $v_p \approx$ 400...440 м/с. Поэтому баллистическая стойкость полиэтиленовых бронепакетов при воздействии на них пуль пистолета ТТ обеспечивается при заметно меньшей поверхностной плотности $m_{тп}$ = 6,6 кг/м^2 по сравнению с бронепакетами из параарамидных тканей, для которых необходимая для защиты по второму классу поверхностная плотность составляет $m_{тп}$ = 9,2...11,2 кг/м^2. Интересно отметить, что по отношению к низкоскоростным пулям пистолета ПМ ($v_0 \approx$ 305...325 м/с) баллистическая стойкость обеспечивается при поверхностной плотности бронепакетов $m_{тп}$ = 2,0...2,3 кг/м^2 независимо от типа материалов.

На третьей стадии взаимодействия пули с текстильным бронепакетом происходит торможение пули без разрушения ткани с дальнейшим развитием тыльного деформационного купола.

3.2.6. Критерий выбора оптимальных характеристик тканей.

Теперь несколько слов о критерии выбора оптимальных материалов для текстильной брони. Будем считать, что торможение пули в процессе взаимодействия с текстильной броней осуществляется за счет превращения ее кинетической энергии W_0 в упругую энергию деформированного объема преграды. Энергия упругого деформирования единицы объема материала преграды определяет-

ся соотношением $W_{упр} = \frac{E\varepsilon^2}{2}$. Пусть масса текстильной брони, участвующая в процессе торможения ударника равна M, тогда деформированный объем будет равен M/ρ_0, а полная энергия деформации этого объема определится произведением $W_{упр}$ на деформированный объем $\frac{E\varepsilon^2}{2}\frac{M}{\rho_0}$. Приравнивая эту энергию к кинетической энергии ударника W_0, получим следующее соотношение для определения M

$$M = \frac{2W_0}{\frac{E}{\rho_0}\varepsilon^2} = \frac{2W_0}{c^2\varepsilon^2}.$$

Минимальное значение М достигается когда ткань работает на пределе, т.е. когда $\varepsilon = \varepsilon_р$. Поскольку M пропорциональна поверхностной плотности преграды $m_{тп}$, то для обеспечения минимальности $m_{тп}$ необходимо выбирать материал с максимальным значением произведения $c\varepsilon_р$, равным критической скорости растяжения нитей [3.3]. Таким образом, баллистическая эффективность текстильной брони определяется не значениями ее прочностных характеристик, а произведением $c\varepsilon_р$, характеризующим способность ткани запасать упругую энергию. Для параарамидных волокон это произведение равно 280...320 м/с, для волокон из зилона – 300...350 м/с, а для полиэтиленовых волокон – 350...400 м/с, что указывает на предпочтительность использования в СИБ защитных структур из полиэтиленовых волокон.

3.2.7. Особенности взаимодействия пули с текстильной броней.

Рассмотренный выше механизм взаимодействия пули с текстильной броней справедлив, строго говоря, для бесконечных поперечных размеров пакета, когда на процесс торможения пули не оказывают влияния краевые эффекты. Реальные бронепакеты имеют конечные поперечные размеры, что оказывает существенное влияние на процесс торможения пули. Оценим некоторые характеристики взаимодействия пули с текстильным пакетом. Обозначим максимальный тыльный прогиб преграды – высоту деформационного купола через w_{max}. Анализ результатов экспериментальных

исследований и численного моделирования процесса взаимодействия пули с текстильным бронепакетом показывает, что зависимость тыльного прогиба w от времени можно представить в виде

$$w = w_{\max}\left(1 - e^{-\frac{t}{t_т}}\right),$$

где $t_т$ – характерное время торможения пули. Дифференцируя это соотношение по времени, получим зависимость скорости пули от времени

$$v = \frac{w_{\max}}{t_т} e^{-\frac{t}{t_т}}.$$

Так как при $t = 0$ скорость пули равна начальной $v = v_0$, то характерное время торможения пули будет равно $t_т = \frac{w_{\max}}{v_0}$. При $w_{\max} =$ 20 мм и $v_0 = 300...500$ м/с характерное время торможения пули оказывается равным $t_т = 40...70$ мкс.

Скорость распространения продольной упругой волны $c_т$ в ткани из-за извитости нитей меньше, чем в нитях. В нитях соответствующая скорость равна 8000...10000 м/с. Положим, что в ткани $c_т = 6000$ м/с. За время $t_т = 50$ мкс продольная волна распространится на расстояние 300 мм.

После того как фронт продольной волны достигнет края пакета, по нитям начнет распространяться отраженная волна разгрузки, в которой напряжения растяжения резко уменьшаются, а скорость перемещения нити в сторону области воздействия пули возрастает. Это произойдет через промежуток времени $t_в \approx l/c_т$ (l – характерный поперечный размер бронепакета), который можно назвать временем волновой реверберации. После достижения волной разгрузки области поперечной волны резко упадет сила сопротивления движению пули, поскольку она пропорциональна натяжению нити. Задача о взаимодействии отраженной продольной волны с поперечной волной в линейной постановке рассмотрена в [3.3].

За фронтом отраженной волны разгрузки нить будет совершать ускоренное продольное перемещение – вытягиваться из ткани. Волна разгрузки в нитях после достижения области воздействия пули отразится второй волной нагрузки, которая после дос-

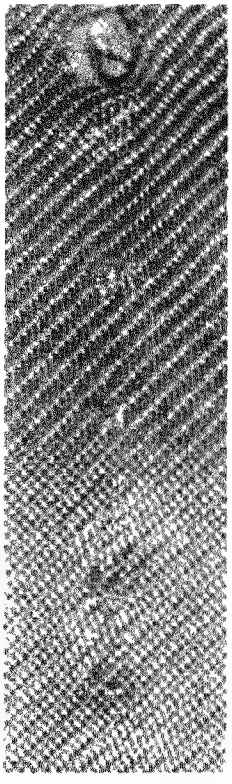


Рис. 3.8. Образование петель при вытягивании нитей

тижения края пакета вновь отразится волной разгрузки. При последовательных отражениях от края пакета скорость вытягивания нитей скачкообразно возрастает, что может привести к «захлестыванию» нитей. Поскольку нити находятся в составе ткани, и их движение тормозится нитями ортогонального направления, то это «захлестывание» приводит к образованию петель, выступающих из ткани (рис. 3.8). Эти процессы будут повторяться до полной остановки пули.

Конечность поперечного размера бронепакета приводит к важности такой характеристики ткани как способность нитей вытягиваться из куска ткани. Эту способность характеризуют усилием вытягивания нитей из куска ткани определенной длины. Именно из-за сопротивления продольному перемещению нити в волнах разгрузки не происходит обнуление напряжения растяжения нити – ткань продолжает сопротивляться проникающию пули.

Интенсивность силы сопротивления вытягиванию нити τ (сила сопротивления на единицу длины нити) можно записать в виде

$$\tau = \tau_{тр} + k_{тр} s_{пр} p,$$

где $\tau_{тр}$ – интенсивность силы сопротивления вытягиванию нити из ткани в свободном состоянии; $k_{тр} \approx 0{,}4$ – коэффициент трения между нитями; $s_{пр}$ – суммарная площадь контактов с нитями ортогонального семейства на единичной длине; p – среднее давление в пакете. В табл. 3.1 приведены экспериментальные значения сил вытягивания нитей в статических условиях из различных типов ткани из нитей СВМ. Данные получены А.Ю. Летниковым.

Рассмотрим некоторые закономерности вытягивания нитей из закрепленного куска ткани длиной l. Пусть к нити приложено усилие f, тогда натяжение нити T на расстоянии x от края куска ткани будет равно

$$T = f - \tau x.$$

Таблица 3.1

Сила вытягивания нитей из различных типов ткани, кг/м

Тип переплетения	Артикул ткани	Сила вытягивания $\tau_{тр}$, Н/м	Длина вытягивания l_{max}, м
полотно	8601	150	0,4
саржа	56319	30	2
сатин	56334	5	12

Для того чтобы нить начала вытягиваться, необходимо приложить нагрузку f, большую силы сопротивления вытягиванию τl. Возникающее при этом натяжение нити не должно превосходить прочность нити на разрыв $f_р$. Максимальная длина куска ткани l_{max}, из которого можно вытянуть нить, может быть определена из соотношения $l_{max} = f_р / \tau_{тр}$. Средняя удельная разрывная нагрузка для высокомодульных нитей может быть принята равной $f_р \approx 200$ сН/текс, что для нитей с линейной плотностью 29,4 текс составит 60 Н. Рассчитанные значения l_{max} приведены в табл. 3.1.

При локальном динамическом нагружении текстильного бронепакета между слоями ткани может развиваться значительное давление, затрудняющее вытягивание нитей вследствие увеличения удерживающей силы трения. Кроме этого при натяжении нити, расположенной вдоль выпуклой поверхности с радиусом кривизны R, на единицу длины нити будет действовать сила давления $p = T/R$. В этом случае усилие вытягивания нитей может значительно возрасти, что приведет к уменьшению l_{max}. Если значение l_{max} станет меньше размера очага деформации, то нити ткани будут разрываться вследствие превышения возникающего в них натяжения прочности нити на разрыв.

Усилие одновременного вытягивания нескольких нитей возрастает нелинейно по отношению к числу нитей, причем у более плотных тканей скорость роста больше, чем у менее плотных тканей. Из полотняной ткани плотностью 140 нитей на 10 см как по основе, так и по утку, изготовленной из нитей Русар с линейной плотностью 58,8 текс, нельзя вытащить одновременно более 9 нитей, поскольку усилие вытягивания превосходит прочность нитей на разрыв [3.9].

Трение между нитями не только способствует поглощению кинетической энергии пули, но и обеспечивает условия проявления высоких механических свойств нитей, предотвращая их поперечное смещение (раздвигание) в деформационном куполе. По мнению некоторых исследователей, уменьшение баллистической стойкости мокрых текстильных бронепакетов вызвано уменьшением коэффициента трения между нитями вследствие того, что вода является своеобразной смазкой, увеличивающей подвижность нитей [3.10]. Наоборот, увеличением трения между нитями с помощью специальных добавок, имеющих хорошую адгезию к нитям, можно увеличить баллистическую стойкость текстильных бронепакетов. В качестве таких добавок используют эластомеры [3.11]; густеющие при быстром сдвиге коллоидные системы на основе наночастиц [3.12, 3.13]; микро- и нанопорошки, увеличивающие коэффициент трения между нитями, подвергнутыми ударному сжатию [3.14]. Необходимо иметь в виду, что улучшение баллистических свойств тканей такими методами ведет к увеличению их поверхностной плотности.

3.3. Энергетический анализ процесса взаимодействия пули с текстильной броней

Кинетическая энергия пули $W_0 = \frac{mv_0^2}{2}$ в процессе взаимодействия с текстильным бронепакетом расходуется на: 1) работу деформирования $A_д$ нитей при их растяжении; 2) работу сил трения $A_{тр}$ при перемещении нитей относительно ткани как в продольном направлении (вытягивание нитей), так и в поперечном (раздвигание нитей); 3) сообщение нитям ткани кинетической энергии $W_к$ вследствие их ускорения как в плоскости ткани, так и в направлении проникания пули; 4) работу $A_{кав}$ вытеснения материалов подложки или имитатора защищаемого объекта, например, пластилина при образовании каверны. В общий баланс энергий и работ следует включить также работу сил трения при проникании пули через бронепакет $A_{пр}$, работу деформирования и разрушения пули $A_п$, тепловые потери Q и другие менее значимые составляющие [3.15].

Поскольку при ударном взаимодействии часть слоев ткани оказывается пробитой, то работа деформирования нитей этих слоев ткани преобразуется в работу их разрушения A_p. Работа деформирования остальных слоев ткани преобразуется в упругую энергию их растяжения W_y. Закон сохранения энергии позволяет записать баланс энергий и работ для некоторого момента времени t, измеряемого от начала взаимодействия

$$\Delta W_{\text{п}} = \frac{mv_0^2}{2} - \frac{mv^2}{2} = A_{\text{р}} + W_{\text{у}} + A_{\text{тр}} + W_{\text{к}} + A_{\text{кав}} + A_{\text{пр}} + A_{\text{п}} + Q,$$

где $\Delta W_{\text{п}}$ – потеря кинетической энергии пули; $\frac{mv^2}{2}$ – текущая кинетическая энергия пули.

Соотношение между перечисленными энергиями и работами зависит от времени, прошедшего от начала взаимодействия пули с бронепакетом. Объединим все диссипативные формы работы в один член $A_{\text{дис}} = A_{\text{тр}} + A_{\text{кав}} + A_{\text{пр}} + A_{\text{п}} + Q$. Примерный вид зависимостей основных энергетических составляющих процесса ударного взаимодействия от времени показан на рис. 3.9. В соответствии с этим рисунком весь процесс взаимодействия пули с текстильным бронепакетом можно разделить на два этапа.

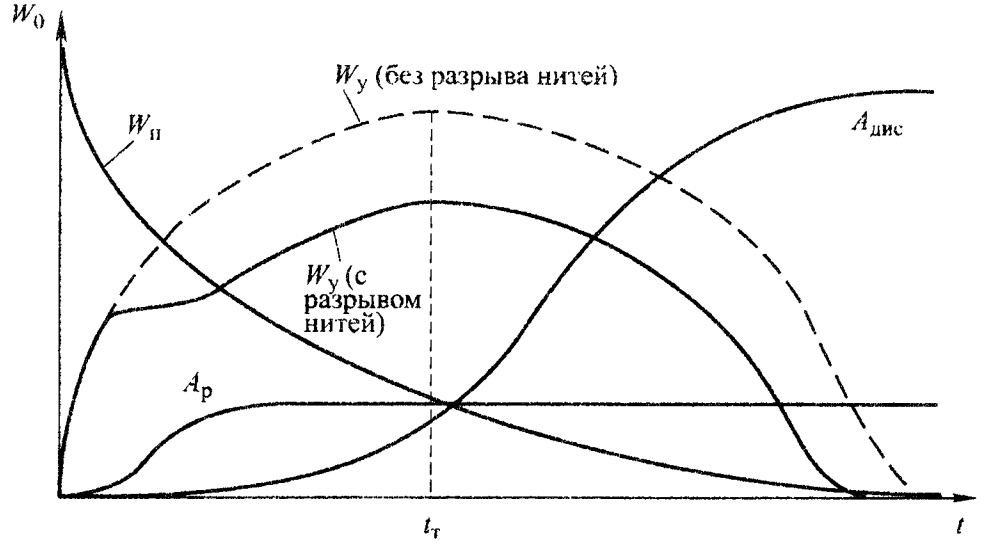


Рис. 3.9. Энергетические составляющие процесса взаимодействия ударника с текстильным бронепакетом в зависимости от времени

На первом этапе в процессе проникания и торможения пули ее кинетическая энергия в основном расходуется на совершение работы упругого растяжения и разрушения нитей ткани. Доля энергии, затрачиваемая на совершение диссипативных работ $A_{дис}$ на этом этапе, незначительна, поскольку для их совершения необходимы значительные перемещения нитей. Баллистическая стойкость бронепакета определяется его способностью запасать упругую энергию без разрушения нитей.

На втором этапе взаимодействия, после того как пуля в основном потеряла скорость, диссипация энергии продолжается путем преобразования упругой энергии, запасенной в нитях в процессе их растяжения, в кинетическую энергию их движения, которая за счет работы сил трения превращается в теплоту. После завершения всех динамических процессов, сопровождающих ударное взаимодействие пули с текстильным бронепакетом, вся кинетическая энергия пули будет затрачена на разрушения нитей ткани A_p и совершение диссипативных работ, имеющих необратимый характер.

В работе [3.15] было выполнено исследование бронепакета, состоящего из 60 слоев ткани саржевого переплетения на основе нитей Русар с линейной плотностью 29 текс, после прострела пулей пистолета ТТ. Бронепакет имел поверхностную плотность $m_{тп}$ = 7,4 кг/м^2 и располагался на пластилиновом блоке. Пуля вошла в пластилин на излете, фактически израсходовав всю энергию в бронепакете. Начальная кинетическая энергия пули составляла W_0 = 520 Дж. В результате проведенного исследования было определено, что на выполнение работы сил трения $A_{тр}$ было затрачено более 50% энергии пули, работа разрушения нитей составила 30% от начальной энергии пули. На все остальные диссипативные работы было затрачено менее 20%.

Несмотря на то, что в конечном итоге весьма значимой оказывается способность бронепакета необратимо поглощать энергию пули за счет работы сил трения, баллистическая стойкость бронепакета определяется его способностью преобразовывать кинетическую энергию пули в обратимую упругую энергию растяжения нитей.

3.4. Методы расчета предельной скорости пробития текстильного бронепакета

Синтез защитных структур на основе текстильной брони представляет собой сложную многопараметрическую задачу, решение которой, как правило, осуществляется эмпирически и требует проведения большого количества экспериментов. Несмотря на надежность получаемой в экспериментах информации, всегда остается сомнение в том, что выбранный вариант защитной структуры является оптимальным. Кроме этого, полученные экспериментальные данные всегда имеют частный характер. Для их обобщения необходима физико-математическая модель взаимодействия пули с текстильной броней.

В соответствии с современным подходом к анализу сложных явлений, исчерпывающее описание процесса взаимодействия пули с текстильной броней, в том числе и определение предельной скорости пробития, может быть достигнуто компьютерным моделированием процесса, для чего, кроме адекватной физико-математической модели, необходимо знание тех конкретных характеристик текстильных материалов, которые определяют баллистическую стойкость текстильной брони.

Работы, посвященные компьютерному моделированию взаимодействия пуль с текстильной броней, условно можно разделить на две группы. Работы первой группы посвящены разработке специализированных программ типа «IMPACT» [3.16], с помощью которых можно рассчитывать кинематические и динамические характеристики процесса нормального соударения недеформируемых пуль с текстильным бронепакетом вплоть до определения количества пробитых слоев и предельной скорости пробития. Эти программы используют упрощенные модели тканей из невзаимодействующих нитей. Сила сопротивления движению пули вычисляется аналогично рассмотренному выше способом. Несмотря на то, что в модели не учитывается ряд важных составляющих процесса взаимодействия пули с текстильной броней, путем подбора подходящих значений прочностных и деформационных характеристик тканей удается достичь удовлетворительного согласия расчетных и экспериментальных данных.

В работах второй группы компьютерное моделирование процесса взаимодействия пуль с текстильной броней осуществляется на более глубоком уровне путем использования мощных прикладных программ численного моделирования многомерных динамических процессов типа LS DYNA [3.17–3.19]. Методом конечных элементов удается воспроизвести деформирование и разрушение многослойного текстильного бронепакета из ткани реальной структуры, учесть взаимодействие (трение) нитей при их взаимном проскальзывании.

Несмотря на достигнутый прогресс в компьютерных методах моделирования процесса взаимодействия пули с текстильной броней, вряд ли можно говорить об их систематическом использовании в проектировании защитных структур СИБ. Основная причина – незнание прочностных и деформационных характеристик нитей и тканей при динамическом деформировании. Получение их в большинстве случаев требует разработки соответствующих экспериментальных методик и проведения трудоемких экспериментов. В связи с этим весьма полезными для анализа результатов экспериментов и проектирования защитных структур являются приближенные расчетные методики, учитывающие основные факторы, определяющие баллистическую стойкость текстильной брони. Одним из путей построения таких методик является использование энергетического подхода к анализу процесса взаимодействия пули с текстильной броней [3.20].

В начальный момент взаимодействия часть кинетической энергии пули расходуется на ускорение присоединенной массы текстильного бронепакета $M_{\text{тп}}$ по механизму неупругого удара. Исходя из законов сохранения импульса и энергии, примененных к неупругому соударению пули массой m с телом массой $M_{\text{тп}}$ (рис. 3.10), для скорости v_1 и кинетической энергии W_1 объединенной системы массой $m + M_{\text{тп}}$ можно получить следующие соотношения

$$v_1 = \frac{mv_0}{m + M_{\text{тп}}},$$

$$W_1 = \frac{(m + M_{\text{тп}})v_1^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2}\frac{1}{1 + M_{\text{тп}}/m} = \frac{mv_0^2}{2}\frac{1}{1 + \beta X},$$

где $X = \frac{\pi d_п^2}{4} \frac{m_т}{m}$ – отношение массы участка текстильного бронепакета, находящегося непосредственно под пулей, к массе пули; β – коэффициент, учитывающий увеличение площади участка пакета, вовлекаемого в движение, по сравнению с площадью поперечного сечения пули.

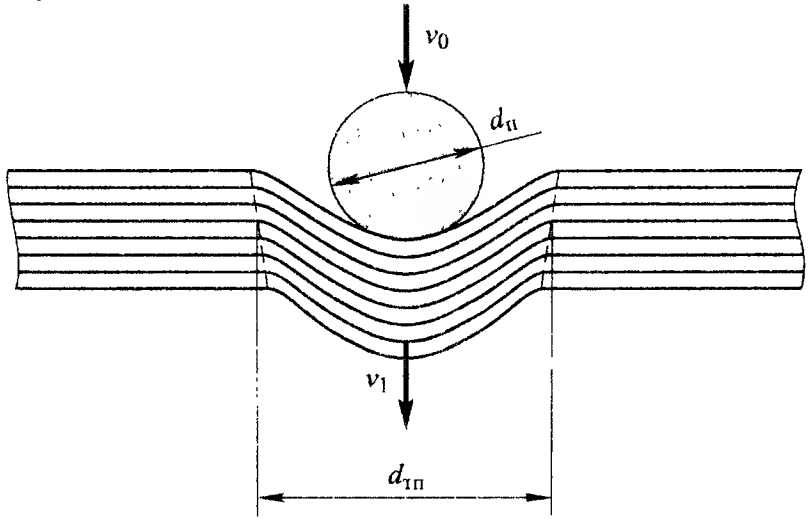


Рис. 3.10. Схема взаимодействия сферического ударника с текстильным бронепакетом

Оценить предельную скорость пробития бронепакета можно, приравняв кинетическую энергию пули и присоединенной массы W_1 к максимальной упругой энергии, которую может запасти бронепакет без разрушения. Полагая, что все нити, формирующие силу сопротивления движению пули, испытывают одинаковую деформацию, получим следующее соотношение

$$\frac{m v_{псп}^2}{2(1+\beta X)} = \frac{E \varepsilon_р^2}{2} \frac{M}{\rho_0}. \qquad (3.6)$$

Массу M деформированного объема ткани можно определить исходя из введенных выше понятий эквивалентных нитей (рис. 3.11). Из этого рисунка следует

$$M = 4\beta_1 d_п c_т t_т m_т,$$

где β_1 = 1,0…2,0 – коэффициент увеличения поперечного размера эквивалентной нити по отношению к диаметру пули; $c_т = \alpha c$ – скорость продольной волны в эквивалентной нити, α = 0,75…1,0 – ко-

эффициент, учитывающий уменьшение скорости распространения продольных волн в нитях в составе ткани вследствие их извитости, $t_т = \frac{w_{max}}{v_0}$ – характерное время торможения пули. Исходя из соображений размерности, будем считать, что на пределе пробития при $v_0 = v_{псп}$ максимально достижимый прогиб w_{max} пропорционален предельной деформации нитей при растяжении $w_{max} = \gamma \varepsilon_р d_п$, где $\gamma \approx (2...4)\varepsilon_р^{-1}$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств нитей ткани.

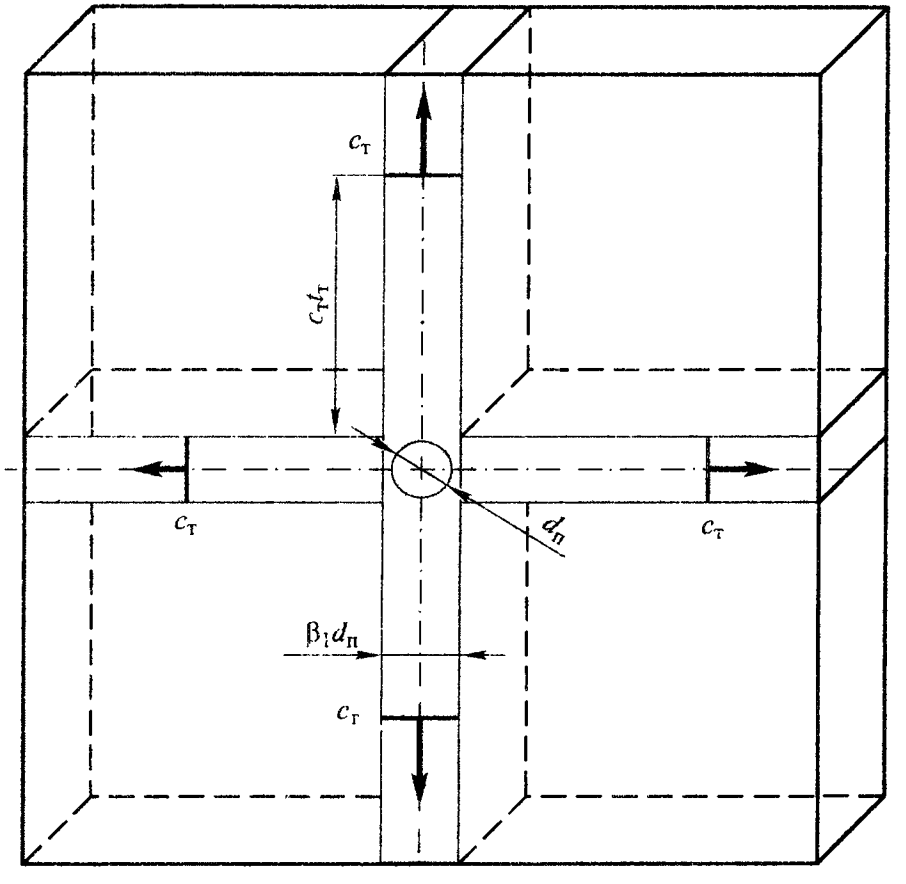


Рис.3.11. Схема вычисления деформированного объема текстильного бронепакета при $t = t_т$

Подставляя в исходное соотношение (3.6) выражения для M, $t_т$ и w_{max}, для оценки предельной скорости пробития получим следующее соотношение

$$v_{\text{псп}} = c\varepsilon_{\text{р}}\sqrt[3]{4\alpha\beta_1\gamma(1+\beta X)\frac{d_{\text{п}}^2 m_{\text{тп}}}{m}}.$$

Обозначив $K = \sqrt[3]{4\alpha\beta_1\gamma}$, получим формулу для оценки предельной скорости пробития бронепакета

$$v_{\text{псп}} = Kc\varepsilon_{\text{р}}\sqrt[3]{(1+\beta X)\left(\frac{d_{\text{п}}^2 m_{\text{тп}}}{m}\right)}. \qquad (3.7)$$

Понятно, что в этой формуле коэффициент K, зависящий от предположений, положенных в основу расчетной модели, по существу, является подгоночным и его вычисление с помощью приведенных выше оценочных зависимостей может дать только порядок величины. Поскольку значение величины $\beta X \approx 0{,}1$ в большинстве практически важных случаях, то в дальнейшем при проведении анализа баллистической стойкости текстильных бронепакетов считается, что $(1+\beta X)^{\frac{1}{3}} \approx 1$.

Основные закономерности пробития текстильных бронепакетов, вытекающие из анализа полученной формулы, состоят в следующем.

1. Предельная скорость пробития пропорциональна произведению скорости продольных волн в нитях на предельную деформацию их удлинения $v_{\text{псп}} \sim c\varepsilon_{\text{р}}$.

2. Предельная скорость пробития пропорциональна кубическому корню из поверхностной плотности текстильного бронепакета $v_{\text{псп}} \sim \sqrt[3]{m_{\text{тп}}}$. Поскольку поверхностная плотность бронепакетов пропорциональна произведению поверхностной плотности ткани $m_{\text{т}}$ и количеству n содержащихся в нем слоев ткани $m_{\text{тп}} = nm_{\text{т}}$, то предельная скорость пробития бронепакетов из одинаковых тканей одинаковыми ударниками пропорциональна кубическому корню из числа слоев ткани $v_{\text{псп}} \sim \sqrt[3]{n}$.

3. Отношение предельных скоростей пробития $v_{\text{псп1}}$ и $v_{\text{псп2}}$ бронепакетов, содержащих n_1 и n_2 слоев ткани ударниками соответственно массой и диаметром m_1, d_1 и m_2, d_2 в соответствии со сделанными выводами должно быть равно

$$\frac{v_{\text{псп1}}}{v_{\text{псп2}}} = \sqrt[3]{\frac{n_1}{n_2}\frac{m_2 d_1^2}{m_1 d_2^2}}. \qquad (3.8)$$

4. Для геометрически подобных ударников диаметром d_1 и d_2 отношение предельных скоростей пробития текстильных бронепакетов, содержащих n_1 и n_2 слоев одинаковой ткани, должно быть равно

$$\frac{v_{\text{псп1}}}{v_{\text{псп2}}} = \sqrt[3]{\frac{n_1}{n_2}\frac{d_2}{d_1}}.$$

Перечисленные закономерности были проверены с использованием экспериментальных данных (табл. 3.2), полученных в ОАО НИИ стали при испытаниях бронепакетов из 18 из 30 слоев различных тканей и имеющих различную поверхностную плотность. Определялась их баллистическая стойкость при воздействии шариками массой 1,05 г и пулями пистолета ПМ (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Защитные характеристики текстильных бронепакетов

Тип ткани	Поверхностная плотность $m_{\text{тп}}$, г/м^2	Кол-во слоев ткани, удерживающих пулю ПМ с Д = 5 м	v_{50} для стального шарика	
			18 слоев	30 слоев
ТСВМ ДЖ Арт. 56319	125±20	24	460±10	550±10
ТСВМ ДЖ Арт. 56319А	130±5	18	510±10	610±10
Кевлар К439	140±10	16	480±10	–
Тварон Ст716	265±10	10	480±10	–
Тексар	460±10	13	470±10	–
Тексар ТТ	470±10	13	480±10	–

Расчетное отношение предельных скоростей пробития должно быть равно $\sqrt[3]{30/18} = 1{,}186$, вычисленные отношения экспериментально определенных скоростей v_{50} колеблются в диапазоне 1,17…1,2.

При проверке соответствия соотношения (3.8) экспериментальным данным по предельным скоростям пробития пакетов с различным числом слоев ткани n_1 и n_2 стальными шариками (m_1 = 1,05 г, d_1 = 6,3 мм) и пулями пистолета ПМ (m_2 = 5,9 г, d_2 = 9 мм, v_1 = 315 м/с) использовалось следующее расчетное соотношение

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt[3]{\frac{5{,}9 \cdot 6{,}3^2}{1{,}05 \cdot 9^2}} \sqrt[3]{\frac{n_1}{n_2}} = 1{,}4 \sqrt[3]{\frac{n_1}{n_2}}.$$

Сравнение разнородных данных дало хорошие результаты – различие между расчетными значениями отношений скоростей и отношениями экспериментально определенных 50 %-ных скоростей пробития не превосходило 8...10 %. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что энергетический подход к определению предельной скорости пробития $v_{\text{псп}}$ правомерен, а полученная с его помощью простая формула для расчета $v_{\text{псп}}$ может быть использована при анализе экспериментальных данных и оценке баллистической стойкости текстильных бронепакетов.

В подразделе 3.2.6 было показано, что минимальная масса деформированного объема M, а, следовательно, и минимальная поверхностная плотность текстильного бронепакета $m_{\text{тп}}$ достигается для таких нитей и тканей, у которых произведение $c\varepsilon_{\text{р}}$, характеризующее способность нитей накапливать упругую энергию, максимально. Из формул (3.6) и (3.7) следует, что максимуму произведения $c\varepsilon_{\text{р}}$ соответствует максимальное значение параметра $\text{J} = v_{50} / \sqrt[3]{nm_{\text{т}}}$, который можно рассматривать в качестве количественного критерия выбора оптимального материала для текстильной брони по конструктивным характеристикам бронепакетов (n, $m_{\text{т}}$) и результатам их баллистических испытаний (v_{50}).

При взаимодействии деформируемых пуль со свинцовыми сердечниками с текстильными бронепакетами в общем энергетическом балансе необходимо учитывать работу деформирования пуль $A_{\text{п}}$ и увеличение их диаметра в процессе торможения. В этом случае простой модели для расчета предельной скорости пробития разработать не удается. В работе [3.21] для 9 мм оболочечных пуль НАТО М882 со свинцовым сердечником экспериментально определены скорости v_{50} для текстильных бронепакетов, состоящих из кевларовой ткани КМ2 с поверхностной плотностью 180 г/м^2. Для

бронепакетов с числом слоев ткани n от 10 до 30, эти данные можно аппроксимировать зависимостью

$$v_{50} = 15\sqrt{63{,}8n - n^2}\ , \text{ м/с.}$$

Обширные экспериментальные данные по v_{50}, полученные при воздействии осколочных поражающих элементов, для ряда текстильных и композитных бронеэлементов в обработанном виде приведены в работе [3.22]. В качестве осколочных поражающих элементов использовались стальные и вольфрамовые поражающие элементы в форме компактных цилиндров, имитаторы осколков по стандарту НАТО STANAG 2920 (стальной цилиндр с двумя скосами на переднем торце), стальные кубики, стальные и вольфрамовые шарики. Поражающие элементы характеризовались массой $m_{пэ}$, которая изменялась в диапазоне 0,13...8,32 г (2...128 гран) и средней площадью миделевого сечения $S_{пэ}$. В отдельных случаях баллистический предел определялся не только при воздействии по нормали к преграде, но под углами θ = 0, 15°, 30°, 45°, измеряемыми между линией воздействия и нормалью к преграде.

Для описания экспериментальных данных использовалась следующая зависимость

$$v_{50} = a_1 a_2^{(\sec\theta - 1)} \exp\left\{ a_3 \left(\frac{m_{тп} S_{пэ}}{m_{пэ}} \right)^{a_4} \right\}, \text{ м/с.} \qquad (3.9)$$

Коэффициенты $a_1 \ldots a_4$, определенные регрессионным анализом экспериментальных данных, приведены в табл. 3.3. Независимо от формы и массы осколочных поражающих элементов все экспериментальные данные хорошо группируются около соответствующих регрессионных зависимостей без больших систематических отклонений.

Таблица 3.3

Коэффициенты $a_1 \ldots a_4$
для текстильных и композитных бронеэлементов

Материал	Значения коэффициентов			
	a_1	a_2	a_3	a_4
Нейлоновая ткань	177,51	1,0460	1,9414	0,4074
Ткань из Кевлара 29	260,21	1,0707	1,9068	0,4586

Окончание табл. 3.3

Материал	Значения коэффициентов			
	a_1	a_2	a_3	a_4
Ткань из Кевлара КМ2	125,82	1,1346	2,7104	0,2728
Ткань из Кевлара 129	134,22	1	2,4589	0,2466
Ткань из Кевлара 49	329,28	1	1,7920	0,6393
Нетканый материал Спектра 1000	1,2095	1	7,114	0,06587
Нейлоновый композит[1]	20,620	1	4,3318	0,2145
Композит[2] из Кевлара 29 (для шлемов)	303,02	1,2070	2,3645	0,7848
Композит[1] из Кевлара 29	179,17	1,2770	2,8198	0,5692
Композит[1] из Кевлара КМ2	204,915	1,33185	2,66771	0,49574
Ламинат Спектра/Кратон	194,3	1,2293	2,6299	0,4491
Стекло-композит[3]	13,532	1,5149	5,1937	0,2658

[1] – связка – фенольная смола;
[2] – связка – фенольная смола + поливинилбутираль;
[3] – связка – полиэфирная смола.

3.5. Баллистическая энергоемкость текстильных бронепакетов

При пробитии бронепакета уравнение сохранения энергии приобретает вид

$$\Delta W_{\text{п}} = \frac{mv_0^2}{2} - \frac{mv_{\text{ост}}^2}{2} = A_{\text{р}} + A_{\text{дис}},$$

где $v_{\text{ост}}$ – остаточная (запреградная) скорость пули. Если в процессе проникания через бронепакет пуля не деформируется, то потеря

кинетической энергии пули $\Delta W_{\text{п}}$ характеризует баллистическую энергоемкость $W_{\text{БЭ}}$ текстильного бронепакета. Экспериментально энергоемкость бронепакета $W_{\text{БЭ}}$ легко определяется путем измерения скоростей пули до соударения с бронепакетом и после его пробития [3.23].

В результате многочисленных экспериментальных исследований [3.23, 3.24] были установлены следующие закономерности.

1. При $v_0 < v_{\text{псп}}$ вся кинетическая энергия пули поглощается текстильным бронепакетом $W_{\text{БЭ}} = \dfrac{mv_0^2}{2}$. При $v_0 > v_{\text{псп}}$ баллистическая энергоемкость текстильных бронепакетов $W_{\text{БЭ}}$ быстро уменьшается при увеличении скорости пули v_0. Характерный вид зависимости $W_{\text{БЭ}}$ от v_0 приведен на рис. 3.12. При пробитии текстильного бронепакета, состоящего из 18 слоев ткани саржевого переплетения из СВМ–нитей (арт. 56319), стальным шариком массой 1,05 г $W_{\text{БЭ}}$ уменьшается с 80 Дж до 40 Дж при увеличении скорости шарика с $v_0 = v_{\text{псп}} \approx 450$ м/с до $v_0 = 900$ м/с [3.23].

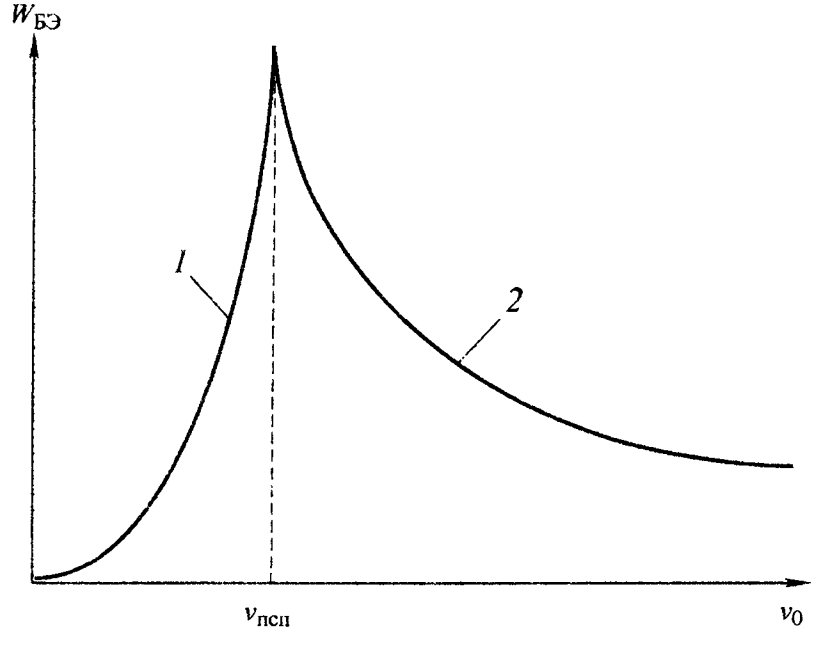


Рис. 3.12. Зависимость баллистической энергоемкости текстильного бронепакета от скорости пули: 1 – в отсутствии пробития; 2 – при пробитии бронепакета

2. Баллистическая энергоемкость единичного слоя ткани $W_{БЭ1} = W_{БЭ}/n$ (n – количество слоев ткани в пакете) не зависит от n и определяется только свойствами ткани и скоростью соударения пули с бронепакетом. В работе [3.23] для ткани арт. 56319 подобрана аппроксимирующая экспериментальные данные зависимость $W_{БЭ1}$ от v_0

$$W_{БЭ1} = 9\exp\{-0{,}0015v_0\},\ [W_{БЭ1}]= \text{Дж},\ [v_0] = \text{м/с}.$$

Установленные закономерности находят разумное объяснение [3.20], если предположить, что баллистическая энергоемкость текстильного бронепакета в случае его пробития в основном определяется работой разрушения $A_р$ нитей слоев ткани, которая равна упругой энергии деформированного объема $V_д = M/\rho_0$ бронепакета в момент достижения нитями предельной деформации удлинения $\varepsilon_р$

$$W_{БЭ} \approx A_р = \frac{E\varepsilon_р^2}{2}\frac{M}{\rho_0}.$$

Подставляя в это соотношение приведенное выше выражение для массы деформированного объема M (3.6), получим аналитическое выражение для баллистической энергоемкости текстильного бронепакета

$$W_{БЭ} = 2\alpha\beta_1\gamma\varepsilon_р^3 c^3 m_т d_п^2 \frac{n}{v_0}.$$

В соответствии с полученным выражением баллистическая энергоемкость оказывается прямо пропорциональной числу слоев ткани в пакете n и обратно пропорциональной скорости соударения пули v_0 с бронепакетом, что соответствует экспериментально установленным закономерностям.

Уменьшение баллистической энергоемкости текстильного бронепакета с увеличением скорости пули объясняется уменьшением деформированного объема вследствие сокращения времени взаимодействия пули $t_т$ с бронепакетом. Экспоненциальная зависимость $W_{БЭ1} = 9\exp\{-0{,}0015v_0\}$ в интервале скоростей 400...1000 м/с хорошо аппроксимируется обратно пропорциональ-

ной зависимостью $W_{БЭ1} = \frac{a}{v_0}$, соответствующей полученному выше аналитическому выражению для $W_{БЭ}$, при $a = 2100$ Дж·м$^{-1}$·с.

Имея экспериментальные зависимости $W_{БЭ}$ от v_0, не представляет труда рассчитать $v_{псп}$ для бронепакета, содержащего n слоев ткани или, наоборот, определить необходимое для предотвращения пробития бронепакета шариком или пулей пистолета ПМ, имеющих скорость v, количество слоев ткани n [3.23].

3.6. Влияние влажности текстильного бронепакета на его баллистическую стойкость

Отрицательным свойством текстильной брони является снижение ее баллистической стойкости при намокании [3.25, 3.26]. Причины намокания (пот, воздействие атмосферной влаги и др.) практически неустранимы. Поэтому баллистические ткани приходится пропитывать водоотталкивающими веществами («Цепель-Д», «Скочгард» и др.), а сами текстильные бронепакеты помещать в водонепроницаемые чехлы. Так как эти мероприятия не исключают полностью возможности намокания бронепакетов, приходится контролировать их баллистическую стойкость во влажном состоянии. В настоящем подразделе рассмотрены некоторые экспериментальные данные, полученные в НИИ стали при исследовании зависимости баллистической стойкости текстильных бронепакетов от их влажности, и дано им теоретическое объяснение.

Сначала рассмотрим физические особенности насыщения бронепакета влагой. Текстильный бронепакет представляет собой тело с открытой пористостью, включающей в себя, как уже упоминалось выше три уровня: внутринитяную, внутрислойную и межслойную пористости. Особую роль в снижении баллистической стойкости текстильного бронепакета при его намокании играет, повидимому, внутринитяная пористость, образуемая межволоконными капиллярами. При относительно плотной упаковке волокон в нитях образуется большое количество тонких капилляров, способных впитывать и удерживать благодаря поверхностному натяжению смачивающую волокна жидкость. Удержание жидкости капиллярной системой основано на явлении смачивания. Высота

поднятия жидкости h в цилиндрическом капилляре радиусом $r_к$ определяется выражением [3.27]

$$h = \frac{2\sigma_{пов}\cos\theta}{r_к g\rho},$$

где $\sigma_{пов}$ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости; ρ – плотность жидкости, θ – краевой угол смачивания (при смачивании $\theta < 90°$); g – ускорение свободного падения. При полном смачивании ($\theta = 0$, $\cos\theta = 1$) высота поднятия воды при температуре 18 °С в капилляре диаметром 5...10 мкм составит 3...6 м. На практике такая высокая степень капиллярного впитывания воды по многим причинам не наблюдается. Основное влияние на капиллярное впитывание оказывает угол смачивания θ, а для полимерных волокон значение угла θ очень часто близко или даже превосходит 90° (например, для полиэтилена $\theta = 114°$). Может создаться впечатление, что текстильный бронепакет из несмачиваемых волокон или обработанных водоотталкивающими веществами тканей не будет намокать. Это не так. Если волокна, из которых состоят нити, водой не смачиваются, то для пропитывания текстильного бронепакета необходимо преодолеть силы капиллярного давления [3.27] $p_к = -2\sigma_{пов}\cos\theta/r_к$. Необходимые для этого силы противодавления легко создаются в текстильном бронепакете в процессе его ношения. Поскольку эти силы носят циклический характер, то насыщение текстильного пакета влагой осуществляется по своеобразному механизму насоса при сдавливании и расширении пакета, когда, например, внешняя влага (дождь) или внутренняя влага (пот) периодически впитываются (вдавливаются) в пакет в межнитяное и межслойное пространство, которое характеризуются достаточно большими диаметрами эквивалентных капилляров – около 50...100 мкм, а потому и небольшим капиллярным противодавлением $p_к = (1–2)\cdot10^3$ Па. На практике, конечно, работают оба механизма насыщения текстильного пакета водой: самопроизвольное капиллярное впитывание воды и принудительное насыщение водой по механизму насоса. Но если при самопроизвольном впитывании воды в смачиваемый пакет происходит заполнение внутринитяных межволоконных капилляров, то при принудительном намокании несмачиваемого пакета вода из-за большого вследствие малости $r_к$

капиллярного давления может не проникать в нити и концентрироваться только в межнитяном пространстве.

Кроме поглощения текстильным бронепакетом воды за счет капиллярных явлений, необходимо упомянуть о поглощении воды текстильным бронепакетом из окружающей среды в результате сорбции (адсорбции и абсорбции) водяных паров волокнами ткани.

При большой влажности окружающего воздуха важную роль начинает играть так называемая капиллярная конденсация, в результате которой микрокапилляры заполняются водой. Необходимым условием капиллярной конденсации является смачиваемость поверхности волокон водой. Роль капиллярной конденсации особенно возрастает при снижении температуры и по мере приближения к 100%-ной влажности окружающей атмосферы [3.4, 3.27, 3.28].

В системе волокно – жидкость действуют адгезионные и когезионные силы: адгезионные – между волокном и жидкостью, когезионные – между молекулами жидкости. При полном смачивании жидкостью поверхности волокна когезионное сцепление является более прочным по сравнению с адгезионным. Поскольку волокна обладают большой удельной поверхностью, то силы, удерживающие их между собой при наличии жидкой прослойки между ними, оказываются значительными – известное явление слипания волокон во влажной нити. Если жидкость не смачивает поверхности волокон, то связывающие их силы оказываются значительно меньшими – работа разъединения волокон оказывается меньшей, чем половина работы когезии. Изменения, происходящие в структуре волокон, нитей и тканей при поглощении ими влаги, приводят к существенному различию физико-механических свойств одного и того же бронепакета с разной степенью влажности.

Экспериментальное исследование влияния влажности текстильных бронепакетов на их баллистическую стойкость осуществлялось на бронепакетах, подвергнутых искусственному дождеванию в течение 10 мин или замачиванию в воде в течение 1 часа. Влажность бронепакетов ξ определяется отношением массы воды в бронепакете к массе сухого бронепакета

$$\xi = (M_{\text{мокр}} - M_{\text{сух}}) / M_{\text{сух}} ,$$

где $M_{сух}$ и $M_{мокр}$ – массы соответственно мокрого и сухого бронепакетов. В результате обстрела определяются 50 %-ные скорости пробития сухого $v_{50сух}$ и мокрого $v_{50мокр}$ бронепакетов. На рис. 3.13 приведены экспериментальные данные, полученные в НИИ стали при обстреле стальными шариками массой 1,05 г и диаметром 6,35 мм 30-слойных бронепакетов из ткани саржевого переплетения арт. 56319. По вертикальной оси отложено относительное снижение скорости $\Delta v_{50}/v_{50} = (v_{50сух} - v_{50мокр})/v_{50сух}$ в %, по горизонтальной – влажность бронепакета ξ также в %.

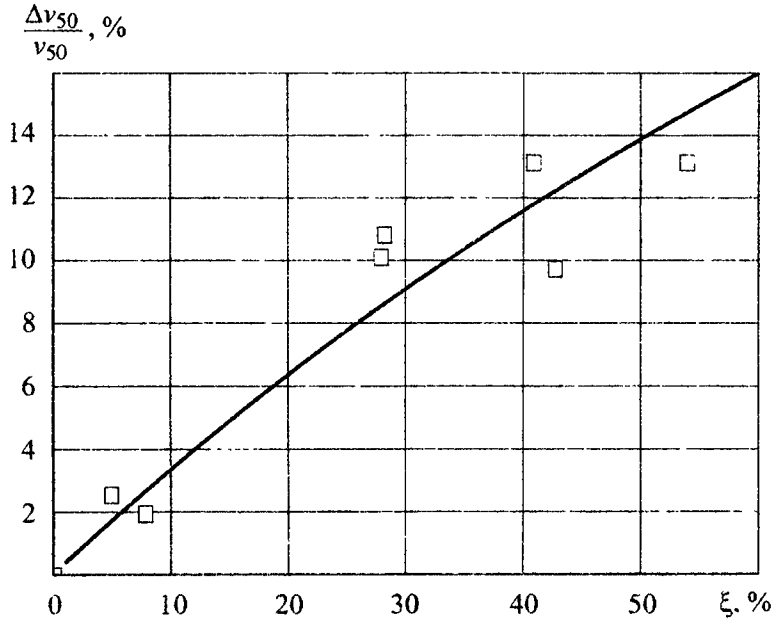


Рис. 3.13. Зависимость относительного снижения пятидесятипроцентной скорости пробития текстильного бронепакета от содержания в нем воды: □ – экспериментальные данные; —— – теоретическая зависимость.

В работе [3.10] снижение баллистической стойкости влажных бронепакетов объясняется уменьшением работы сил трения при перемещении нитей вследствие уменьшения коэффициента трения между ними – вода играет роль смазки. В соответствии с развиваемой нами энергетической концепцией влияние влажности на баллистическую стойкость текстильных бронепакетов проявляется через уменьшение деформированного объема $V_д$ вследствие

уменьшения скорости распространения продольных волн в нитях, содержащих воду [3.20].

Скорость распространения упругих волн в нитях $c_н$ определяется отношением модуля упругости нити к плотности материала нити $c_н = \sqrt{E/\rho_н}$. Если модуль упругости малопористых полимерных волокон практически не зависит от содержания воды, то увеличение линейной плотности нитей, содержащих воду или другую жидкость, приводит к уменьшению скорости распространения волн в нитях вследствие увеличения их инерции. Линейную плотность нити $\rho_н$, содержащей воду в межволоконных капиллярах, можно вычислить с помощью соотношения

$$\rho_н = \rho_м(1+\xi),$$

где $\rho_м$ – плотность материала волокон, ξ – массовая доля воды (относительно массы сухой нити). Тогда скорость распространения продольных волн в мокрых нитях $c_н$ может быть определена с помощью соотношения

$$c_н = \sqrt{\frac{E}{\rho_н}} = \sqrt{\frac{E}{\rho_м(1+\xi)}} = \frac{c}{\sqrt{1+\xi}}.$$

Такая зависимость остается справедливой до тех пор, пока межволоконные капилляры не заполнятся водой полностью. При дальнейшем увеличении содержания воды в межнитяном и межслойном пространствах ее влияние на скорость распространения упругих волн, по-видимому, уже не будет сказываться столь сильно. Поэтому в зависимость для определения скорости продольных волн в нитях в составе мокрых бронепакетов следует подставлять некоторое эффективное значение влажности $\xi_{эф} = \kappa\,\xi$, где коэффициент $\kappa < 1$ учитывает уменьшение влияния влажности при значениях ξ больших 0,2. С учетом вышесказанного теоретическая зависимость для относительного снижения предельной скорости пробития мокрого текстильного бронепакета будет иметь вид

$$\frac{\Delta v_{псп}}{v_{псп}^{сух}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{1+\kappa\xi}}\,\frac{\varepsilon_р^{мокр}}{\varepsilon_р^{сух}},$$

где $\varepsilon_p^{мокр}$, $\varepsilon_p^{сух}$ – предельные деформации удлинения мокрой и сухой нитей. Для к = 0,7 и $\varepsilon_p^{мокр}/\varepsilon_p^{сух} = 1$ эта зависимость представлена на рис. 3.13 сплошной линией.

С учетом того, что на баллистическую стойкость бронепакета случайным образом влияют накопление ущерба при множественном обстреле, способы замачивания и другие, менее контролируемые факторы, согласие экспериментальных данных и результатов теоретического анализа можно считать вполне удовлетворительным и подтверждающим энергетическую концепцию баллистической стойкости текстильных бронепакетов.

3.7. Влияние свойств материала подложки на баллистическую стойкость текстильных бронепакетов

При экспериментальном определении баллистической стойкости текстильные бронепакеты располагают либо на малоплотных подложках из войлока или эластичного пенопласта, например, пенополиэтилена (ППЭ), имитирующих антитравматическую подкладку бронежилетов, либо на плотных сплошных подложках из пластилина или желатиновых блоков, имитирующих защищаемый объект. Результаты экспериментов, приведенные в работах [3.20, 3.29] и в табл. 3.4, свидетельствуют о том, что баллистическая стойкость текстильных бронепакетов, характеризуемая, например, баллистическим пределом v_{50}, зависит от свойств материала подложки.

В частности, баллистический предел v_{50} текстильных бронепакетов, располагаемых на пластилиновых подложках, оказывается заметно ниже v_{50} для тех же бронепакетов, располагаемых на войлочных подложках. Особенно это различие значимо при малом числе слоев ткани. Несколько неожиданным явилось то, что баллистический предел бронепакетов v_{50}, располагаемых на тонких (5…8 мм) и легких подкладках из пенполиэтилена, оказалась близкой к скорости пробития бронепакетов, располагаемых на пластилине, а не на малоплотном войлоке. Поскольку баллистическая стойкость текстильных бронепакетов является главной характеристикой защищающей способности бронежилетов, необходимо ра-

зобраться в понимании физической сущности ее зависимости от свойств материала подложки.

Таблица 3.4

Баллистическая стойкость (v_{50}, м/с) текстильных бронепакетов из ткани ТСВМ ДЖ арт. 56319 с подложками из различных материалов

Количество слоев ткани, n	Материал подложки		
	Войлок	Пластилин	Эластичный ППЭ
4	312	225	234
6	398	–	–
12	440	–	–
18	484	453	465
20	512	458	–
30	600	–	–
100	1000	–	–

Примечание: прострел стальным шариком $d = 6{,}35$ мм, $m = 1{,}03$ г.

Баллистическая стойкость текстильной брони определяется ее способностью преобразовывать кинетическую энергию ударника в упругую энергию растяжения нитей слоев ткани, из которых состоит бронепакет. Такое преобразование энергии при поперечном ударе по текстильному пакету осуществляется системой продольных и поперечных волн, распространяющихся в нитях. Для реализации механизма деформирования нитей в продольных и поперечных волнах необходимо согласованное движение нитей и ударника. Вовлечение в движение первоначально покоящихся слоев ткани осуществляется волной сжатия, образующейся в пакете на начальной стадии взаимодействии ударника с текстильным пакетом. В этой волне сжатия происходит не только ускорение слоев ткани, но и уплотнение пакета, выборка зазоров, начальное натяжение нитей, образование крестообразной структуры, формирующей силу сопротивления движению ударника. Как показано в подразделе 3.1, максимальное давление p в волне сжатия может быть определено с помощью соотношения $p = \rho_0 v^2 \rho_м / (\rho_м - \rho_0)$, где ρ_0 – плотность

текстильного пакета; $\rho_м$ – плотность полимера, из которого изготовляются нити; v – скорость ударника. В диапазоне скоростей v = 300…500 м/с максимальное давление в волне сжатия достигает значений p = 0,1…1,25 ГПа.

Путем совместного рассмотрения процессов распространения продольных и поперечных волн в нитях и волны сжатия в текстильном пакете в подразделе 3.1 установлено, что время формирования $t_ф$ системы из продольных и поперечных волн равно $t_ф = \frac{r_п}{v}\left(1 - \sqrt{1-(v/b)^2}\right)$, где $r_п$ – радиус пули или шарика, b – скорость поперечных волн в нитях. При $t < t_ф$ лицевые слои ткани текстильного пакета будут подвергаться сжатию до давления p и интенсивному сдвиговому деформированию без растяжения нитей. При этом, как правило, происходит разрушение нескольких лицевых слоев ткани вследствие интенсивного сдвигового деформирования, которое иногда ассоциируют с «раздавливанием» волокон.

По истечении времени $t_ф$ поперечные волны в нитях отрываются от поверхности пули и нити ткани вовлекаются в поперечное движение еще до того, как их достигнет поверхность головной части пули. Распространяющаяся в нитях продольная волна растяжения поставляет материал в очаг деформации, предотвращая их обрыв.

При выходе волны сжатия на границу раздела текстильного бронепакета с подложкой в зависимости от сжимаемости и инерционности материала подложки возможно отражение волны сжатия (пластилиновая подложка) или волны разрежения (отсутствие подложки или легкая подложка из эластичных пенопластов).

Отраженная волна сжатия тормозит движение слоев ткани, что приводит к увеличению давления в зоне воздействия ударника и, как следствие, к возможности пробития по сдвиговому механизму нескольких дополнительных слоев ткани. В итоге – ослабление бронепакета, уменьшение его баллистической стойкости. В последующие моменты времени наличие плотного инерционного материала подложки также затрудняет формирование деформационного купола, что отрицательно сказывается на баллистической стойкости бронепакета, поскольку ограничивает основной механизм поглощения кинетической энергии ударника путем ее преобразования в упругую энергию растяжения нитей.

Отраженная волна разрежения наоборот ускоряет движение тыльных слоев ткани, что приводит к расслоению текстильного пакета, уменьшает коллективность сопротивления слоев ткани. В итоге – также ослабление баллистической стойкости текстильного бронепакета.

Для обеспечения максимальной баллистической стойкости текстильных бронепакетов сжимаемость материала подложки, точнее антитравматического амортизатора, должна быть максимально близка к сжимаемости текстильного бронепакета. В этом случае амплитуда отраженных волн будет мала и их ослабляющим влиянием на баллистическую стойкость бронепакетов можно пренебречь. Войлок, по-видимому, в наибольшей степени из исследованных материалов соответствует этому условию и поэтому обеспечивает максимальную скорость пробития v_{50} бронепакетов среди других исследованных материалов подложки.

ЛИТЕРАТУРА

3.1. Харченко Е.Ф. Новые представления о механизме взаимодействия текстильных материалов с пулями и осколками при проектировании высокоэффективных бронематериалов // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – 2004.– Вып. 3(136) – 4(137).

3.2. Папков С.П. Полимерные волокнистые материалы. М.: Химия, 1986, 224 с.

3.3. Рахматуллин Х.А., Демьянов Ю.А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках. – М.: Физматлит, 1961. – 400 с.

3.4. Сагомонян А.Я. Волны напряжения в сплошных средах. – М.: Издательство Московского университета, 1985. – 416 с.

3.5. Walker J.D. Constitutive Model for Fabrics with Explicit Static Solution and Ballistic Limit // Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Ballistics – San Antonio, USA. – 1999.

3.6. Walker J.D. Ballistic Limit of Fabrics with Resin // Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Ballistics – Interlaken, Switzerland. – 2001.

3.7. Porval P.K., Phoenix S.L. Modeling System Effects in Ballistic Impact into multi-Layered Fibrous Materials for Soft Body armor // Intern. Journal of Fracture, 2005, №10.
3.8. Тимошенко С.П., Войновский–Кригер С. Пластины и оболочки. – М.: Наука, 1966.
3.9. Бова В.Г., Тихонова А.И., Ржевцева Ю.И. Взаимодействие групп нитей с тканями разных текстильных переплетений // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. –2005.– Вып. (3)140 – 4(141).
3.10. Bazhenov S.L. Dissipation of energy by bulletproof aramid fabric // Journal of Material Science, 1997, vol.32, p. 4167–4173.
3.11. Ahmad M.R., Ahmad W.Y., Saleh J., Samsury A. Performance of Natural Rubber Coated Fabrics under Ballistic Impact // Malaysian Polymer Journal, 2007, Vol. 2, No. 1.
3.12. Lee Y.S., Wetzel E.D Wagner N.J. The Ballistic Impact Characteristics of Kevlar Woven Fabrics Impregnated with Colloidal Shear Thickening Fluid // Journal of Material Science, 2003, vol.38, p. 2825–2833.
3.13. Protective fabrics utilizing shear thickening fluids (STFs) // The 4-th Conference on Safety and Protective Fabrics. USA, Pittsburg, 2004.
3.14. Dishler L., Moer T.T., Henson J.B. Dilatant Powder Coated Fabric and Containment Articles Formed Therefrom. US patent 5776839, 1998.
3.15. Харченко Е.Ф., Зеленов Н.А. О разложении энергии пули на составляющие при взаимодействии с текстильными бронематериалами // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – 2005. – Вып. 3 (140)–4 (141).
3.16. Ломов С.В. Расчетное прогнозирование защищающей способности СИБ / Труды Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». – СПб.: НПО СМ.– 1999.
3.17. Bonong Gu. Ballistic Penetration of Conically Cylindrical Steel Projectile into Plain-woven Fabric Target – A Finite Element Simulation / Journal of Composite Materials. – 2004, Vol. 38, No. 22.

3.18. Yen C., Scott B., Cheeseman B. A Comparison between Experiment and Numerical Simulation of Fabric Ballistic Impact / Proceedings of the Twenty Third International Symposium on Ballistics – Tarragona, Spain. –2007.
3.19. Сапожников С.Б., Долганина Н.Ю., Сахаров С.А. Моделирование динамики взаимодействия ударника и многослойного тканевого пакета // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – 2005. – Вып. 3 (140)–4 (141).
3.20. Григорян В.А.. Кобылкин И.Ф., Маринин В.М. Энергетический подход к определению предельной скорости пробития текстильных бронепакетов // Девятая международная научно-практическая конференция «Новейшие тенденции в области конструирования и применения баллистических материалов и средств защиты». – М.: НИИ стали, 2007.
3.21. Rupert N.L. 9-mm Baseline Data Set for the Calibration of Fabric Penetration Models // Proceedings of the Twentieth International Symposium on Ballistics – Orlando, USA. –2002.
3.22. Cunnif P.M. A Design Tool for the Development of Fragmentation Protective Body Armor // Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Ballistics – San Antonio, USA. –1999.
3.23. Маринин В.М., Хромушин В.А. Определение характеристик энергоемкости защитных конструкций на основе текстильной брони при баллистическом ударе // Экстремальные состояния вещества. Детонация, Ударные волны. – Труды международной конференции «VII Харитоновские тематические научные чтения». – Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2005.
3.24. Bourget D., Pageau G. The Effective Ballistic Resistance Concept, a New Approach for Assessing the Average Energy Absorption Capability of Armor Materials // Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Ballistics – San Antonio, USA. – 1999.
3.25. Сильников М.В., Химичев В.А. Средства индивидуальной бронезащиты. Учебное пособие. – СПб.: Фонд «Университет», 2000.
3.26. Концептуальные основы создания средств индивидуальной защиты. Часть I. Бронежилеты. Под общ. ред. В.Г. Михеева.

М.: Межакадемическое изд. «Вооружение. Политика. Конверсия», 2003. – 340 с.
3.27. Сивухин Д.В. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Наука, 1990. – (Общий курс физики; Т. 2).
3.28. Бузов Б.А., Алыменкова Н.Д. Материаловедение в производстве изделий легкой промышленности (швейное производство). – М.: Изд. центр «Академия», 2004.
3.29. Григорян В.А., Буланова М.Е., Дашевская О.Б., Маринин В.М., Хромушин В.А. Влияние некоторых факторов на противоосколочную стойкость текстильной брони из основных арамидных тканей // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – 2005. – Вып. 3 (140)–4 (141).

Глава 4. ПОЛИМЕРНАЯ КОМПОЗИТНАЯ БРОНЯ

4.1. Композиционные материалы

Композиционные материалы (КМ) – многокомпонентные материалы, состоящие из сплошной основы (матрицы, связующего) и дискретного армирующего материала. Путем подбора состава и свойств армирующего материала и связующего получают композиционные материалы с необходимым сочетанием физико-механических, эксплуатационных и технологических свойств. Обычно армирующий материал определяет прочностные свойства КМ, а матрица обеспечивает монолитность материала и его сдвиговую прочность, превращает дискретный армирующий материал в единую механическую систему, способствует равномерному распределению напряжений. По структуре композиционные материалы делятся на несколько основных классов: волокнистые (армированы волокнами, нитями, нитевидными кристаллами), слоистые (армированы слоями ткани, пленками, пластинками и другими слоистыми материалами), дисперсноупрочненные (армированы материалами в виде дисперсных частиц с размерами 0,1...100 мкм) и нанокомпозиты (в их состав входят наночастицы с размерами 10...100 нм).

В защитных структурах СИБ применяются все перечисленные классы КМ. Но наибольшее распространение получили КМ, у которых в качестве связующего используются полимерные материалы, а в качестве армирующего материала – нити, жгуты, ткани или нетканые слоистые структуры из синтетических высокомодульных высокопрочных параарамидных или полиэтиленовых волокон. Такие КМ относятся к группе волокнистых или слоистых КМ, сокращенно их называют органопластиками. Органопластики применяются для изготовления шлемов и энергоемких жестких подложек комбинированной, например, керамикоорганопластиковой многослойной брони.

4.2. Органопластики

Общая характеристика армирующих материалов органопластиков – синтетических высокомодульных высокопрочных параарамидных или полиэтиленовых волокон и изготовленных из них нитей и тканей была дана во втором разделе. Поэтому здесь коротко остановимся на свойствах связующих материалов, во многом определяющих не только технологию изготовления соответствующих защитных структур, но и их баллистическую стойкость.

Полимерные связующие материалы делятся на два основных класса: термореактивные и термопластичные [4.1, 4.2]. Первые представляют собой вязкие жидкости (при температуре переработки), которые после пропитки армирующего материала и формообразующих технологических операций за счет химических реакций полимеризации превращаются в неплавкую твердую полимерную матрицу. Этот химический процесс, который, как правило, идет при повышенной температуре, называется отверждением. В качестве термореактивных связующих традиционно используют такие полимеры как эпоксидные олигомеры, ненасыщенные полиэфиры, мочевино- и фенол-формальдегидные системы, олигоимиды и другие термореактивные сетчатые полимеры. Их основные преимущества: низкая стоимость и хорошие технологические свойства. К основным недостаткам термопластичных связующих следует отнести хрупкость и низкую сопротивляемость ударным нагрузкам. Для сведения к минимуму этих недостатков при создании защитных структур СИБ в состав термореактивных связующих вводят пластификаторы, например, поливинилбутираль. Механические свойства некоторых термореактивных связующих приведены в табл. 4.1.

Второй класс связующих – термопластичные полимеры, в исходном состоянии находятся в твердом состоянии, а при повышении температуры могут многократно переходить в жидкое состояние, пропитывать армирующий материал и при охлаждении образовывать достаточно прочный КМ. В качестве термопластичных связующих используют следующие полимеры: полиуретаны, полиэтилен, полипропилен, фторопласты, ПВХ, полиамиды и другие термопластичные полимеры. Свойства некоторых термопластичных связующих приведены в табл. 4.2 [4.1, 4.2].

Таблица 4.1

Физико-механические свойства термореактивных связующих [4.2]

Характеристики	Плотность, г/см^3	Прочность, МПа	Модуль упругость, ГПа	Предельная деформация, %	Ударная вязкость, кДж·м$^{-2}$
Полиэфиры	1,24…1,44	55…96	2,1	5…300	2…10
Эпоксиды	1.11…1,39	28…90	0,69…3,45	3…50	5…20
Фенол–формальдегиды	1,38…1,94	34…48	6,9…9,7	–	–
Полиамиды	1,4	83…207	3,45…4,14	2…12	–

Таблица 4.2

Физико-механические свойства термопластичных связующих

Связующее	Модуль упругости $E\cdot10^{-2}$	Прочность, МПа		Предельное удлинение, %	Ударная вязкость, кДж·м$^{-2}$
		при растяжении	при сжатии		
Полиэтилены:					
высокого давления	–	10…17	12	400…600	–
низкого давления	6…8,5	20…45	20…36	300…800	2…150
среднего давления	8…12,5	18…40	–	200…1300	7…120
Полипропилен	–	25…40	20–36	200…800	33…88
Фторпласт-4	–	14…35	10…12	250…500	100
Поликарбонат	24…28	57…70	80…90	50…100	120…140
Полиамид 6	12…15	55…77	77…85	100…150	90…130
Фенилон П	–	90	320	4	20

Главным преимуществом армированных термопластов с точки зрения использования их в СИБ является сочетание высокой прочности с высокой ударной вязкостью и трещиностойкостью. Широкому распространению органопластиков с термопластичным связующим мешает высокая вязкость расплавов полимеров, из-за чего приходиться работать с высокими давлениями и температурами. Для преодоления этих трудностей предложены разные способы, например, волоконная и пленочные технологии [4.2]. Из связующего сначала получают либо волокна, которые смешивают с волокнами армирующего материала или вводят в состав тканей, либо пленки, которые выкладывают в формообразующую матрицу или нама-

тывают поочередно с лентой или тканью из армирующего материала. После этого полученный пакет или изделие прессуют при высокой температуре – связующее расплавляется и проникает между нитями и волокнами, превращаясь при остывании в полимерную матрицу.

Чтобы устранить недостатки каждого из классов связующих и добиться оптимального сочетания свойств применяют различные смеси полимеров. Введение каучуков в эпоксидные и другие хрупкие термореактивные связующие повышает вязкость разрушения и ударную стойкость композитов и несколько снижает предел прочности и модуль упругости КМ. К тем же эффектам приводит модификация термореактивных связующих термопластами. Эпоксидные олигомеры снижают вязкость, улучшают технологичность термопластов.

Механические свойства некоторых органопластиков приведены в табл. 4.3 [4.1, 4.2].

Несмотря на то, что полимерные органопластики по сравнению с другими КМ характеризуются высокими прочностными показателями, их модуль упругости существенно ниже, чем у армирующих нитей, особенно у органопластиков на основе тканей – в 3...5 раз. Данное обстоятельство приводит к уменьшению продольной скорости звука в органопластиках примерно в два раза.

Модуль упругости $E_{оп}$ и предел прочности $\sigma_{оп}$ органопластиков приближенно могут быть определены по так называемым смесевым формулам

$$\begin{aligned} E_{оп} &= \alpha v_{в} E_{в} + v_{св} E_{св}, \\ \sigma_{оп} &= \alpha v_{в} \sigma_{в} + v_{св} \sigma_{св}, \end{aligned} \qquad (4.1)$$

где $v_{в}$, $v_{св}$ – объемное содержание в композите соответственно волокон или нитей и связки; $E_{в}$, $E_{св}$, $\sigma_{в}$, $\sigma_{св}$ – соответственно их модули упругости и пределы прочности; α – коэффициент, зависящий от расположения волокон или нитей: при однонаправленном расположении $\alpha = 1$, при двунаправленном ортогональном $\alpha = 0{,}5$, при случайном расположении $\alpha \approx 3/8$.

Таблица 4.3

Физико–механические характеристики органопластиков

Характеристики	Арамидные нити + эпоксидная смола		Ткань кевлар 49 + эпоксидная смола	Ткань из арамидных нитей + полиамид 68*
	Нить, жгут	ткань		
Плотность, г/см^3	1,25…1,38	1,24…1,33	1,33	1,1…1,2
Прочность на растяжение, МПа: – вдоль волокна; – поперек	 1400…2200 12,3…28,2	 500…700 –	 517 –	 450…550 –
Модуль упругости, ГПа: – вдоль волокна; – поперек	 78…95 4.1…55	 26…41 –	 40 –	 36 –
Прочность при сжатии МПа	200…300	150…250	–	–
Прочность при изгибе, МПа	500…700	300…400	347	450
Относительное удлинение, %	1,7…2,2	1,7…2,4	1,5	–
Прочность при межслоевом сдвиге, МПа	30…80	20…30	–	–

* Полиамид 68 – термопластичное связующее: модуль упругости ~ 30 ГПа, прочность при растяжении 100…120 МПа, предельное удлинение ~ 10 % [4.1].

4.3. Баллистическая стойкость органопластиков, используемых в СИБ

Из опыта известно, что баллистическая стойкость органопластиковой брони существенно ниже баллистической стойкости ее текстильной основы. На рис. 4.1 показана зависимость 50%-ной скорости пробития v_{50} и сдвиговой прочности органопластиковой брони в зависимости от содержания эпоксидного связующего [4.5]. При содержании связующего большем 40% v_{50} уменьшается более

чем в два раза, в то время как сдвиговая прочность достигает максимума. Наличие связующего ослабляет защитные свойства текстильной брони, во-первых, вследствие уменьшения подвижности нитей, как в поперечном, так и продольном направлениях и, во-вторых, вследствие уменьшения скорости распространения в них продольных волн.

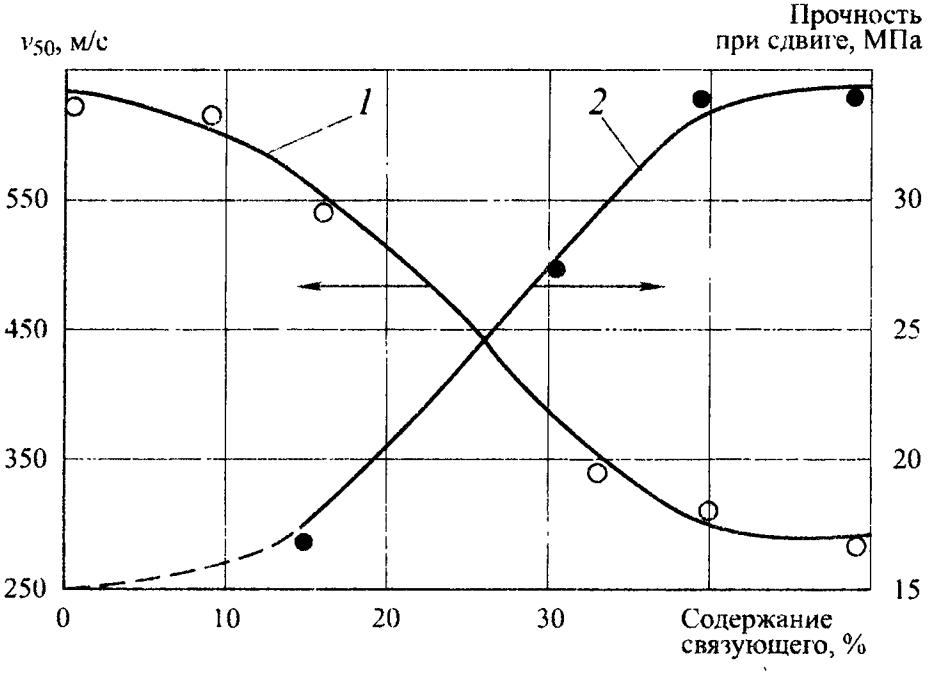


Рис. 4.1. Зависимость баллистического предела v_{50} (*1*) и прочности при межслойном сдвиге (*2*) композитного бронематериала от содержания эпоксидного связующего

Отсутствие подвижности нитей приводит к тому, что меняется механизм взаимодействия пули с броней – сила торможения пули образуется не вследствие сложения сил натяжения нитей, проходящих через область воздействия, а вследствие инерционного и прочностного сопротивлений прониканию пули в органопластиковую преграду или срезу преграды по периферии области воздействия, как это происходит при воздействии пуль на металлические преграды. При таком механизме взаимодействия баллистическая стойкость определяется, в основном, твердостью и сдвиговой прочностью материала преграды и в меньшей степени прочностью армирующих нитей на растяжение. Невысокая скорость звука в КМ

препятствует рассредоточению энергии удара на больший объем материала преграды, что дополнительно уменьшает ее баллистическую стойкость. Тем не менее, баллистическая стойкость органопластиков к ударно-проникающему воздействию имитатора осколков (стального шарика массой 1,1 г) остается достаточно высокой, что и определяет ее использование в защитных структурах СИБ.

Оценим теоретически уменьшение предельной скорости пробития органопластиковой преграды в зависимости от содержания связующего материала. Будем считать, что при относительно небольшом содержании связки баллистическая стойкость органопластиковой преграды определяется способностью ее текстильной основы преобразовывать кинетическую энергию ударника в упругую энергию растяжения нитей без их разрушения. Максимальная упругая энергия W_y, которая может быть запасена текстильной основой, равна упругой энергии деформированного объема $V_д$ при достижении нитями деформации разрушения $W_y = \frac{E\varepsilon_p^2}{2} V_д$, где E – упругий модуль растяжения нитей. В соответствии с энергетической концепцией влияние связующего на баллистическую стойкость органопластиковых преград проявляется через уменьшение деформированного объема $V_д$ вследствие уменьшения скорости распространения упругих продольных и поперечных волн в нитях, окруженных связующим материалом.

В главе 3 с использованием представлений о волновом характере деформирования нитей в продольных и поперечных волнах получена формула для предельной скорости пробития текстильного бронепакета

$$v_{псп} = Kc\varepsilon_p \left(\frac{m_{тп} d_п^2}{m} \right)^{\frac{1}{3}},$$

в которой K – коэффициент, характеризующий свойства ткани и геометрию ее деформирования; c – скорость распространения продольных волн в нитях ткани; $m_{тп}$ – поверхностная плотность текстильного бронепакета; $d_п$, m – диаметр и масса ударника. Для того чтобы применить эту формулу для вычисления предельной скорости пробития органопластиковых преград, необходимо знать зави-

симость скорости звука в нитях $c_н$ от содержания связующего материала.

Как известно, скорость распространения упругих волн в нитях $c_н$ определяется отношением модуля упругости нити к ее плотности $c_н = \sqrt{E/\rho_н}$. В связи с тем, что модуль упругости СВМ нитей многократно превосходит модуль упругости связующего материала, можно считать, что модуль упругости нитей в составе органопластиковой преграды практически не зависит от содержания связки. В то же время связующий материал, прочно скрепленный с нитями, увеличивает линейную плотность нитей, что приводит к уменьшению скорости распространения волн в нитях вследствие увеличения их инерции. Линейную плотность нити $\rho_н$, окруженной связующим материалом, можно вычислить с помощью соотношения $\rho_н = \rho_м(1+\xi)$, где $\rho_м$ – плотность материала волокон, ξ – массовая доля связки (относительно массы сухой нити). Тогда скорость распространения продольных волн $c_н$ в нитях в составе органопластиковой преграды может быть определена с помощью зависимости

$$c_н = \sqrt{\frac{E}{\rho_н}} = \sqrt{\frac{E}{\rho_м(1+\xi)}} = \frac{c}{\sqrt{1+\xi}}.$$

Эта зависимость остается справедливой при относительно небольшом содержания в КМ связующего материала $\xi < 0{,}2$. При большем содержании связки ее влияние на скорость распространения упругих волн, по-видимому, уже не будет сказываться столь сильно. Поэтому в зависимость для определения скорости продольных волн в нитях в составе органопластиковых преград следует подставлять некоторое эффективное значение $\xi_{эф} = \kappa\xi$, где коэффициент $\kappa < 1$ учитывает уменьшение влияния содержания связки при значениях ξ больших 0,2.

С учетом вышесказанного теоретическая зависимость для вычисления предельной скорости пробития органопластиковой преграды $v_{псп}^{оп}$ будет иметь вид

$$v_{псп}^{оп} = \frac{v_{псп}^{тп}}{\sqrt{1+\kappa\xi}} \frac{\varepsilon_р^{оп}}{\varepsilon_р^{тп}}, \qquad (4.2)$$

где $v_{псп}^{тп}$ – предельная скорость пробития текстильной основы органопластиковой преграды; $\varepsilon_р^{оп}$, $\varepsilon_р^{тп}$ – предельные деформации удлинения нитей в составе органопластиковой преграды и текстильного бронепакета.

Полученная оценочная формула качественно соответствует хорошо известному опытному факту – баллистическая стойкость органопластиковой брони ниже стойкости ее текстильной основы. Однако это справедливо лишь при относительно малой поверхностной плотности органопластиковой преграды. В работе [4.6] приводятся данные, свидетельствующие о том, что уже при отношении массы преграды под ударником к массе ударника $X = \left(\frac{m_{тп} d_п^2}{m} \right) \geq 0{,}4$ баллистическая стойкость органопластиковых преград начинает превосходить стойкость их текстильной основы. Потеря нитями подвижности и уменьшение скорости распространения продольных волн компенсируется увеличивающей изгибной жесткостью и сдвиговой прочностью органопластиковых преград. Соответствующая зависимость для вычисления предельной скорости пробития имеет вид

$$v_{псп}^{оп} = v_{псп}^{тп} \sqrt{\frac{1 + \xi(\beta X)^3}{1 + \xi}} . \qquad (4.3)$$

Удовлетворительное согласие с экспериментальными данными (рис. 4.2) реализуется при $\beta = 2{,}56$ [4.6].

Для преград из некоторых КМ эмпирические зависимости для определения предельной скорости пробития приведены в подразделе 3.8.

Применяемая в СИБ органопластиковая броня по необходимости должна обладать минимальной поверхностной плотностью, а ее структура для сохранения приемлемой баллистической стойкости должна обеспечивать определенную подвижность нитей. Наиболее просто этого можно добиться путем уменьшения содержания связующего в КМ, не допуская пропитывания нитей. Но одновременно с этим уменьшаются изгибная жесткость и сдвиговая прочность органопластика, которые необходимы для обеспечения конструкционной прочности силовой оболочки бронешлема или жесткой

подложки для керамики. Удовлетворительный компромисс достигается различными технологическими приемами изготовления органопластиковых бронепанелей и шлемов.

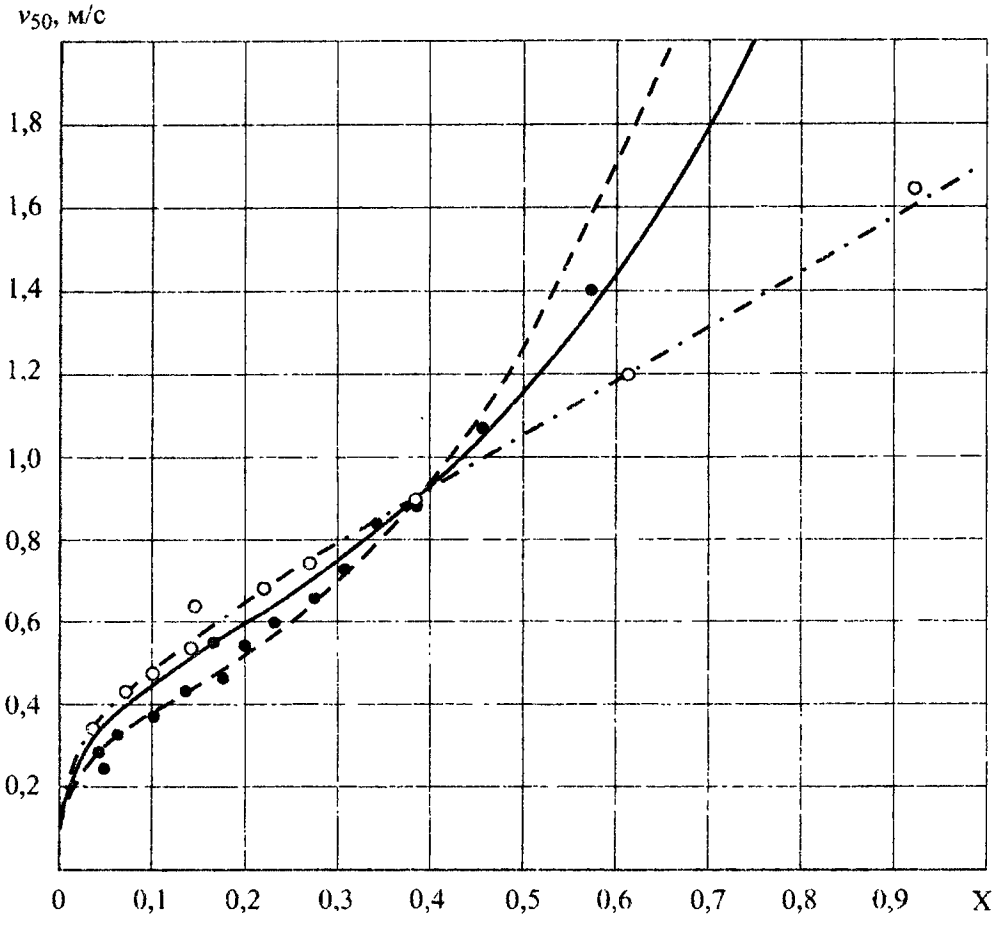


Рис. 4.2. Зависимости 50 %-ной скорости пробития текстильных и органопластиковых плоских преград от отношения массы преграды под ударником к массе ударника: ○ – текстильный бронепакет из кевлара 29; ● – органопластик из кевлара 29; —·—· – текстильный бронепакет; —— – органопластик с 18 % связующего; - - - - – органопластик с 40 % связующего

В [4.5] предлагается формовать силовые оболочки бронешлемов с дифференцированным распределением связующего компонента по толщине текстильного бронепакета (рис. 4.3). В [4.3] описаны результаты экспериментальных исследований, проведенных фирмой «AKZO Nobel», по поиску оптимальных связующих для изготовле-

ния шлемов. В этих исследованиях в качестве армирующего компонента использовалась полотняная ткань (670/670 нитей/дм) из арамидных нитей «Тварон 750» с линейной плотностью 336 текс. Бронепакет из 15 слоев ткани пропитывался различными связующими, отличающимися вязкостью и прочностью адгезионного сцепления слоев ткани. На рис. 4.4 *а*, *б* приведены зависимости количества слоев ткани, останавливающих свинцовую пулю, от прочности сцепления слоев (*а*) и вязкости связующего (*б*). Оптимальная прочность сцепления составляет 40...60 Н/см.

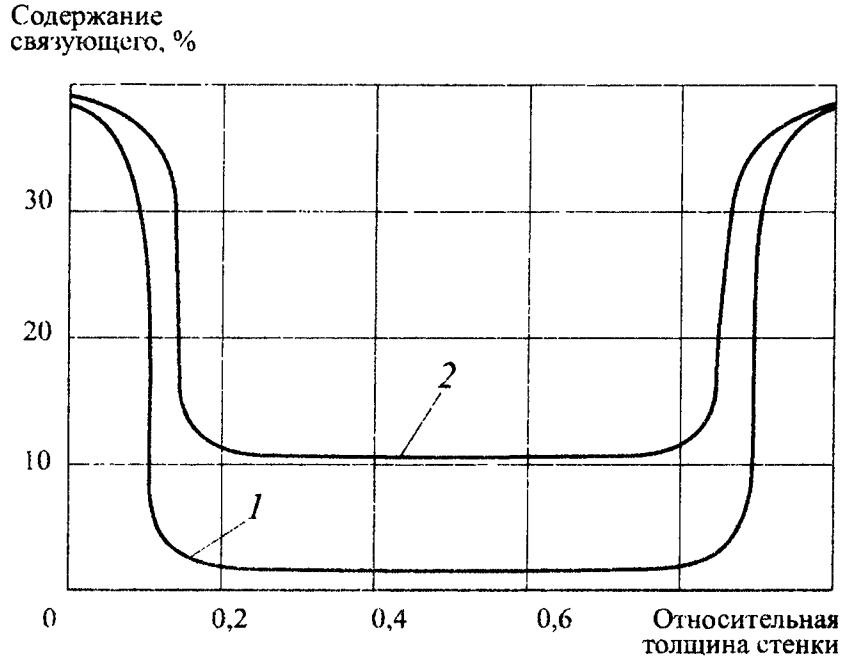
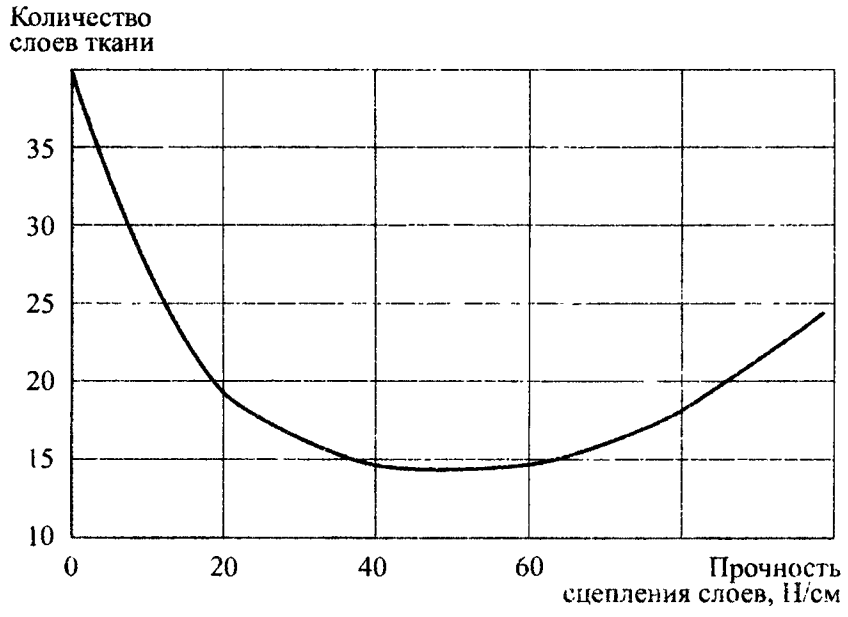
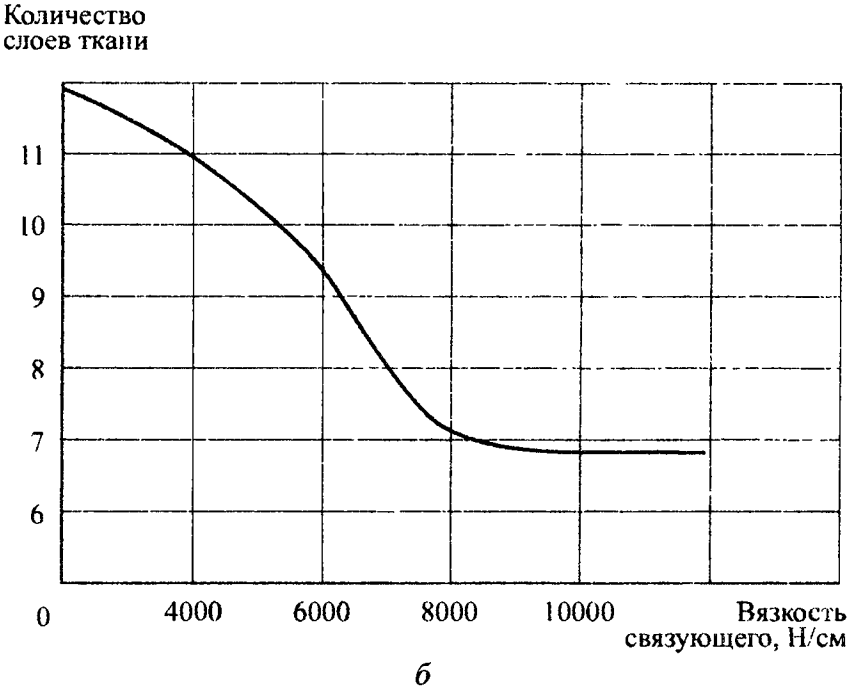


Рис. 4.3. Распределение содержания связующего по толщине стенки шлема [4.5]: *1* – оптимальное содержание (12 %), обеспечивает v_{50} = 560 м/с; *2* – повышенное содержание (20 %), обеспечивает v_{50} = 480 м/с

Баллистическая стойкость органопластика возрастает с увеличением вязкости связующего и достигает максимального стационарного значения при вязкости большей 8000 Н/см (рис. 4.4 *б*). Маловязкое связующее легко пропитывает ткань, заполняет межво-



а



б

Рис. 4.4. Зависимости количества слоев баллистической ткани «Тварон», останавливающих свинцовую пулю, от свойств связующего: *а* – от прочности сцепления слоев ткани; *б* – от вязкости связующего

локонные капилляры и при затвердевании практически полностью исключает подвижность волокон и нитей. Наоборот, вязкое связующее, оставаясь на поверхности ткани, оставляет внутренние волокна нитей не связанными, что в определенной степени позволяет включить в силу торможения пули натяжение нитей, обладающих некоторой подвижностью. Данное обстоятельство способствует увеличению баллистической стойкости органопластика.

Недостатком рассмотренных технологий изготовления органопластиковых бронепанелей или бронешлемов является трудность контроля степени пропитки слоев ткани, что может приводить к неприемлемому разбросу баллистических свойств изделий.

Наилучшей прессовой технологией, позволяющей управлять количеством термопластичного связующего в различных слоях органопластика, является пленочная или волоконная технологии. Эти технологии реализованы в НИИ стали при изготовлении полимерных бронешлемов (рис. 4.5) [4.4,].

Особое место среди баллистических органопластиков занимают бронепанели и бронешлемы, изготовленные на основе высокопрочных высокомодульных волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Эти волокна в отличие от арамидных не перерабатываются в ткани методом текстильных операций, а формуются в виде специальных листов, представляющих собой структуру из двух однонаправленных слоев некрученой нити, развернутых друг относительно друга под прямым углом и фиксируемых с помощью связующего. В качестве связующего при формовании полиэтиленовых защитных бронеэлементов используют полимеры, обладающие адгезией к полиэтилену – полиизобутилен, бутилкаучуки и др. Такая технология, разработанная голландской фирмой DSM, получила название «Шилд», а полиэтиленовые материалы, производимые по такой технологии, известны под торговым названием «Спектра Шилд». Эластичность используемых связующих обеспечивает некоторую подвижность нитей – позволяет нитям вытягиваться из бронепанели и изгибаться вдоль направления воздействия, т.е. включать энергоемкий механизм торможения пуль натяжением нитей. Отсутствие операции ткачества позволяет исключить повреждение волокон в процессе ударного уплотнения ткани. Необходимо отметить, что по технологии «Шилд» можно перерабатывать и другие высокопрочные волокна.

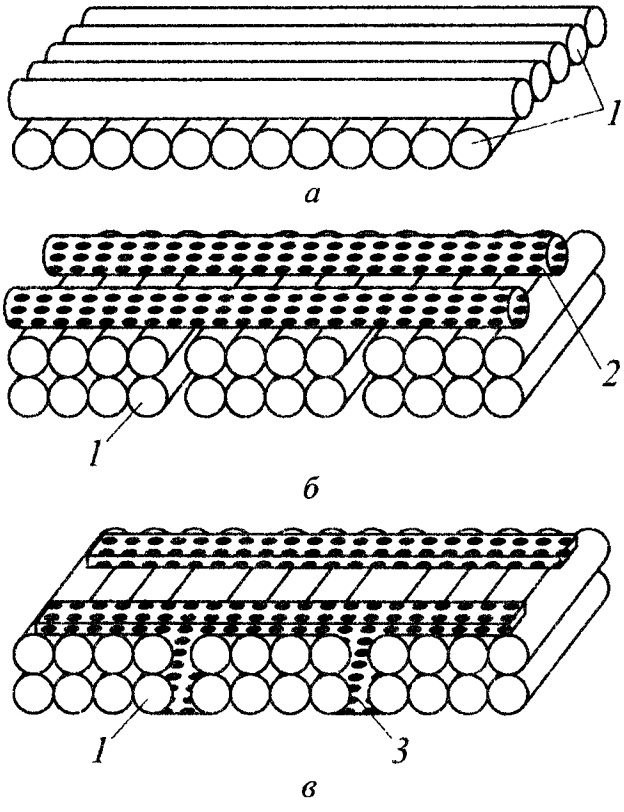


Рис. 4.5. Схематичное изображение идеальной однонаправленной структуры с поперечным расположение волокон (*а*), заготовки с использованием матричных легкоплавких волокон (*б*) и однонаправленная структура после термопрессования (*в*): *1* – армирующие арамидные волокна; *2* – матричные волокна; *3* – расплавленные матричные волокна (связующее)

Другой тип связующего, который используют при производстве структурно одномерных композитов «Дайнема UD», это обычная полиэтиленовая пленка. Методом прессования полотен «Дайнема UD» с содержанием 25% полиэтиленового связующего изготавливают бронеэлементы второго класса защиты с поверхностной плотностью 6,9 кг/м^2. Поверхностная плотность полиэтиленовых пластин, останавливающих пулю из автомата АК-74, – 16 кг/м^2; пулю из винтовки СВД – 17 кг/м^2 [4.3].

В работе [4.7] приведены результаты исследования баллистической стойкости мягких и жестких бронепанелей из сверхвысокопрочного сверхвысокомолекулярного полиэтилена Dyneema. В качестве поражающих элементов использовались имитаторы осколков (FSP) по стандарту NATO STANAG 2920 массой m = 0,237 г; 0,486 г; 1,1 г; 2,79 г; 5,3 г и 13,4 г. Поверхностная плотность бронепанелей $m_п$ изменялась в пределах 2,5...5 кг/м^2. Соответствующие экспериментальные данные приведены на рис. 4.6. Их обработка показала, что на пределе пробития удельная кинетическая энергия поражающих элементов примерно линейно зависит от поверхностной плотности бронепанели $m_п$

$$\frac{mv_{50}^2}{2S_{пэ}} \approx \chi m_п,$$

где $S_{пэ}$ – средняя площадь миделевого сечения поражающего элемента, χ – коэффициент, равный для мягкой панели 1,2, для жесткой – 1,0. По результатам экспериментов построена аппроксимирующая зависимость 50% скорости пробития от поверхностной плотности панели и массы поражающего элемента

$$v_{50} = Cm_п^{1/2} m^{1/6}, \quad [m_п] = \text{кг/м}^2, \quad [m] = \text{г}.$$

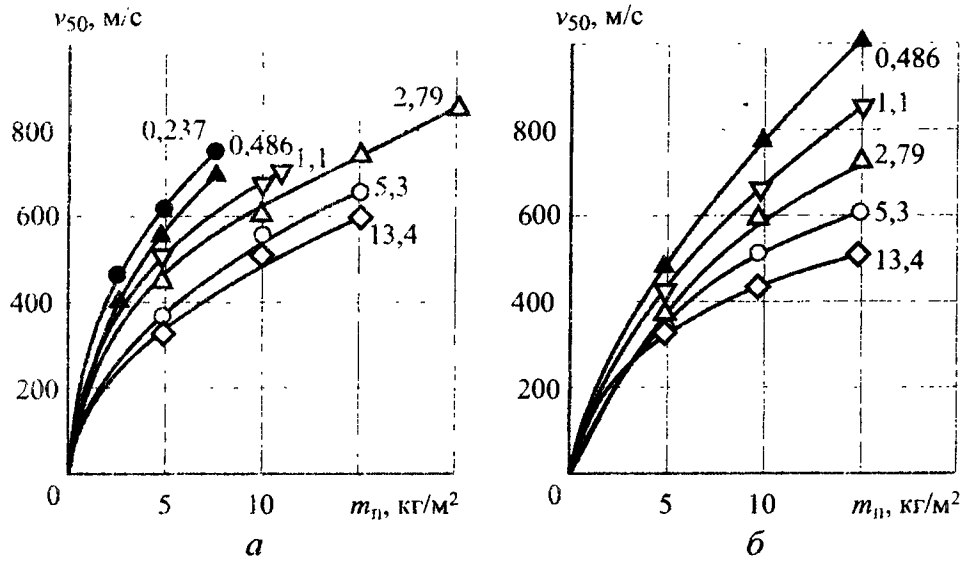


Рис. 4.6. Зависимости баллистического предела v_{50} мягких (*а*) и жестких (*б*) полиэтиленовых панелей от их поверхностной плотности. Цифры около кривых означают массы поражающих элементов

Для мягкой панели $C = 227$, для жесткой $C = 207$. При одинаковой поверхностной плотности баллистический предел мягких панелей оказался примерно на 10% больше, чем баллистический предел пробития жестких панелей. Однако если сравнивать баллистические пределы при одинаковом содержании материала Dyneema, то различие будет незначительным. Тем не менее, мягкие панели оказываются более эффективными при воздействии больших и массивных поражающих элементов, потому что они легче вовлекаются в движение по сравнению с жесткими панелями.

4.4. Влияние кривизны оболочки бронешлема на его баллистическую стойкость

Анализ известных экспериментальных и теоретических результатов, полученных при исследовании баллистической стойкости бронешлемов, позволяет сделать вывод о том, что тыльные прогибы, образующиеся в тканево-полимерных бронешлемах при воздействии пуль и осколков, превосходят тыльные прогибы в плоских бронепанелях из того же самого материала при аналогичных воздействиях [4.8, 4.9].

Механизмы разрушения и пробития органопластиковой преграды при высокоскоростном ударе многообразны и включают в себя сдвиговое разрушение (срез по периметру области воздействия, пробитие по механизму срезания пробки), разрушение связки (потеря сплошности преграды), растяжение и обрыв нитей, расслоение (деламинизация) преграды и другие процессы [4.10]. Но эти механизмы разрушения одинаковы для плоской и искривленной преград. Единственным различием в поведении этих преград является возможность изменения первоначальной формы выпуклой преграды при ударном воздействии по механизму потери устойчивости.

Вопросы устойчивости выпуклых оболочек при их внешнем нагружении сосредоточенной силой рассмотрены в книгах [4.11, 4.12]. При воздействии внешней достаточно большой сосредоточенной силы оболочка претерпевает локальную деформацию с образованием прогиба – шарового сегмента, близкого по форме к зеркальному изображению его первоначальной формы (рис. 4.7). Деформирование оболочки связано с ее значительным изгибом в ме-

ридиональной плоскости. Этот изгиб сопровождается появлением значительных напряжений растяжения–сжатия в срединной поверхности в направлении параллелей.

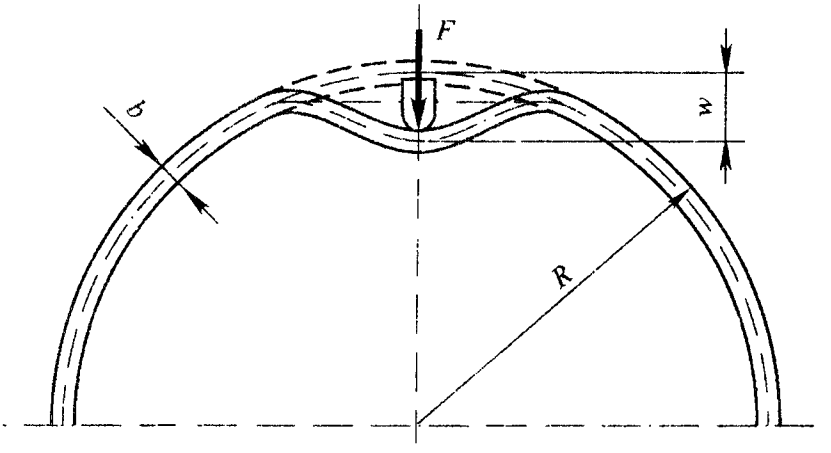


Рис. 4.7. Прогиб сферической оболочки при внешнем нагружении сосредоточенной силой

Энергетический анализ процесса деформирования тонкой выпуклой оболочки под действием сосредоточенной силы F, нормальной к поверхности оболочки, показывает, что прогиб оболочки w связан с силой F соотношением [4.12]

$$F = \frac{3\pi\eta}{2} E b^{5/2} (k_1 + k_2) \sqrt{w} ,$$

где постоянная $\eta \approx 0{,}19$, b – толщина оболочки, k_1 и k_2 – главные кривизны оболочки в точке приложения силы. Работа этой силы $A_{об}$, совершаемая в процессе деформирования оболочки, равна

$$A_{об} = \pi\eta E b^{5/2} (k_1 + k_2) w^{3/2} . \qquad (4.4)$$

Для сферической оболочки радиуса R

$$F = 3\pi\eta E b^{5/2} \frac{\sqrt{w}}{R},$$

$$A_{об} = \frac{2\pi\eta E b^{5/2} w^{3/2}}{R} .$$

В плоской мембране при больших прогибах $w \sim F^{1/3}$, а в тонкой сферической оболочке $w \sim F^2$, что отчасти объясняет, почему в шлемах тыльные прогибы больше, чем в плоских бронепанелях из того же самого материала.

При высокоскоростном воздействии пуль или осколков оболочка стального шлема может быть пробита без ее прогиба, например, по механизму срезания пробки или по механизму пролома с образованием лепестковой пробоины. Для того чтобы этого не произошло необходимо, чтобы работа срезания пробки или работа образования лепестковой пробоины превосходили работу прогиба оболочки до допустимой величины $w_{доп}$. В этом случае энергетически более выгодно не разрушать, а деформировать преграду.

Для установления количественных закономерностей сравним работы срезания пробки и прогиба выпуклой оболочки. Сила сопротивления срезанию пробки $F_{ср}$ равна произведению предела сдвиговой прочности материала оболочки $\tau_{ср}$ на площадь боковой поверхности пробки πbd. Работа срезания пробки $A_{ср}$ вычисляется путем интегрирования этой силы по высоте пробки. В результате интегрирования получается следующее выражение для $A_{ср}$

$$A_{ср} = \frac{\pi b^2 d \tau_{ср}}{2}.$$

Условием непробития оболочки шлема по механизму срезания пробки является неравенство $A_{ср} \geq A_{об}$ или

$$\frac{\pi b^2 d \tau_{ср}}{2} \geq \frac{2\pi \eta E b^{5/2} w^{3/2}}{R}.$$

Это неравенство накладывает следующее ограничение на физико-механические свойства материала оболочки шлема

$$\frac{\tau_{ср}}{E} \geq \frac{4\eta b^{1/2} w_{доп}^{3/2}}{dR}.$$

Для характерных размеров и свойств материала стального бронешлема это неравенство не выполняется, поскольку его левая часть (ее значение равно около 0,0025), примерно на порядок меньше значения правой части. Таким образом, стальной бронешлем будет про-

биваться по механизму срезания пробки или образования лепестковой пробоины, а прогиба оболочки происходить не будет.

Пробитие оболочек бронешлемов из органопластиков с небольшим количеством связующего компонента по механизму срезания пробки, особенно пулями с полусферическими головными частями, не реализуется. Из-за сохраняющейся, хотя и ограниченной, подвижности нитей механизм пробивания таких органопластиковых преград должен походить на механизм пробивания текстильных бронепакетов – при воздействии пули нити смещаются как в поперечном, так и продольном направлениях, образуя силу сопротивления прониканию пули вследствие их растяжения. Предельная скорость пробития $v_{\text{псп}}^{\text{ОП}}$ органопластиковой оболочки шлема по такому механизму может быть вычислена с помощью формул (4.2) или (4.3).

С другой стороны, предельная скорость непробития $v_{\text{нп}}$ может быть определена исходя из равенства кинетической энергии пули работе прогиба оболочки (4.5). Для сферической оболочки [4.13]

$$v_{\text{нп}} = 2\sqrt{\frac{\pi\eta E b^{5/2} w_{\text{доп}}^{3/2}}{mR}}\,. \qquad (4.5)$$

Для органопластикового бронешлема с характеристиками R = 120 мм, b = 5 мм, $w_{\text{доп}}$ = 10 мм и пули пистолета ПМ с m = 5,9 г, E = 25…50 ГПа предельная скорость непробития изменяется в пределах $v_{\text{нп}}$ = 380…545 м/с.

Из вышеизложенного следует, что для обеспечения удовлетворительной баллистической стойкости органопластикового бронешлема необходимо выполнение неравенства

$$v_{\text{псп}}^{\text{ОП}} \geq v_{\text{нп}}\,. \qquad (4.6)$$

В этом случае оболочка бронешлема не пробивается, а кинетическая энергия пули расходуется на деформирование оболочки шлема по механизму прогиба. При этом тыльный прогиб оболочки не должен превосходить допустимого $w_{\text{доп}}$. После подстановки в неравенство (4.6) зависимостей для предельной скорости пробития органопластиковой преграды (4.2) и предельной скорости непробития (4.5) выпуклой оболочки получаем многопараметрическое нера-

венство [4.13], связывающее конструктивные характеристики оболочки шлема – R, b, $m_{тп}$; физико-механические характеристики нитей текстильной основы – c, $\varepsilon_р$; изгибный модуль упругости органопластика E и состав органопластика – ξ с характеристиками средства поражения – m, $d_п$, $w_{доп}$

$$\frac{Kc\varepsilon_р^{оп}}{\sqrt{1+\kappa\xi}}\left(\frac{m_{тп}d_п^2}{m}\right)^{\frac{1}{3}} \geq 2\sqrt{\frac{\pi\eta E b^{5/2} w_{доп}^{3/2}}{mR}}. \qquad (4.7)$$

В практических расчетах изгибный модуль упругости E в первом приближении можно определить с помощью смесевой формулы (4.1).

В качестве критерия оптимальности конструкции бронешлема следует использовать условие минимальности его массы, о которой можно судить по поверхностной плотности оболочки $m_{об} = m_{тп}(1 + \xi)$.

ЛИТЕРАТУРА

4.1. Композиционные материалы: Справочник/ В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

4.2. Зеленский Э.С., Куперман А.М., Горбаткина Ю.А., Иванова-Мумжиева В.Г., Берлин А.А. Армированные пластики – современные конструкционные материалы // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева), 2001, т. XLV, №2.

4.3. Концептуальные основы создания средств индивидуальной защиты. Часть I. Бронежилеты. Под общ. ред. В.Г. Михеева.– М.: Межакадемическое изд. «Вооружение. Политика. Конверсия», 2003. – 340 с.

4.4. Харченко Е.Ф. Актуальные проблемы оптимизации существующих и разработки новых структур волоконно-композитных бронематериалов // Вопросы оборонной техники. Серия 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении, 2003. – Вып. 1–2.

4.5. Харченко Е.Ф. Исследование технологии композитных бронешлемов и перспективы ее совершенствования // Вопросы

оборонной техники. Серия 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении, 2002. – Вып. 1–2.
4.6. Walker J.D. Ballistic Limit of Fabric with Resin // Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Ballistics – Interlaken, Switzerland, 2001.
4.7. Van Gorp E.H.M., Van der Loo L.L.H., Van Dingenen J.L.J. A Model for HPPE Lightweight Add-on Armour // Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Ballistics – Quebec, Canada. – 1993.
4.8. Борисов В.А., Калгин А.Н., Богданов В.В. Проектирование комбинированного бронешлема // Вопросы оборонной техники. Серия 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении, 2003. – Вып. 1–2.
4.9. Van Hoof J., Cronin D.S., Worswick M.J., Williams K.V., Nandalla D. Numerical Head and Composite Helmet Models to Predict Blunt Trauma // Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Ballistics – – Interlaken, Switzerland, 2001.
4.10. Грещук Л.Б. Разрушение композитных материалов при ударах с малыми скоростями. // Динамика удара. Пер. с англ. под ред. С.С. Григоряна. – М.: Мир, 1985.
4.11. Тимошенко С.П., Войновский–Кригер С. Пластины и оболочки. – М.: Наука, 1966.
4.12. Погорелов А.В. Геометрические методы в нелинейной теории упругих оболочек. – М.: Наука, 1967.
4.13. Кобылкин И.Ф. Баллистическая стойкость текстильной и органопластиковой брони // Оборонная техника, 2008. – Вып. 1–2

Глава 5. МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ БРОНЯ

5.1. Стальная броня

Лучшие образцы текстильной и органопластиковой брони позволяют обеспечить защиту по второму классу ГОСТ Р 50744-95 при поверхностной плотности защитной структуры 6...8 кг/м^2. Для защиты от средств поражения, обладающих большей кинетической энергией (автоматные и винтовочные пули), необходимо использовать чисто металлические или комбинированные защитные структуры, включающие в себя металлические, композиционные или керамические бронеэлементы.

Металлическая броня как класс включает в себя броневые стали, высокопрочные алюминиевые и титановые сплавы. Наиболее широко используется стальная броня. С ее помощью возможно обеспечение защиты вплоть до пятого класса при толщине бронеэлемента 5,0...6,5 мм, что соответствует поверхностной плотности 39...51 кг/м^2. Большие толщины стальных бронеэлементов недопустимы из-за их чрезмерно большого веса.

Броневая сталь представляет собой среднеуглеродистую, среднелегированную сталь мартенситного класса. Высокие прочностные характеристики броневых сталей для СИБ достигаются в результате термообработки, включающей в себя закалку на мартенсит и низкий отпуск. Для того чтобы получить представление о свойствах и структуре броневых сталей, коротко рассмотрим их состав и основные превращения, происходящие при термообработке [5.1].

Как известно, основой стали является сплав железа Fe с углеродом С. Железо имеет две полиморфные модификации α и γ. Модификация Fe_α имеет ОЦК решетку и существует в двух интервалах температур: до 911 °С и 1392...1539 °С. Модификация Fe_γ имеет ГЦК решетку и существует в интервале температуры от 911 °С до 1392 °С. ГЦК – решетка более компактна, чем ОЦК – решетка. В

связи с этим при фазовом переходе $\alpha \rightarrow \gamma$ объем железа уменьшается приблизительно на 1 %. Углерод при нормальных условиях существует в двух кристаллических модификациях (графит – стабильная модификация и алмаз – метастабильная модификация) и аморфной форме в виде сажи.

В составе стали железо и углерод присутствуют в виде растворов и химических соединений, представляющих собой следующие фазы: феррит, аустенит, цементит и графит.

Феррит (*Ф*, α) – твердый раствор внедрения С в Fe_α, имеет ОЦК – решетку. Растворимость углерода в ОЦК – решетке очень низкая: в низкотемпературном феррите – 0, 02 %, в высокотемпературном – 0,1 %. Значительная часть атомов углерода вынуждена размещаться на дефектах решетки – вакансиях и дислокациях. Феррит, кроме углерода, растворяет и другие элементы. Азот образует твердый раствор внедрения, а металлы, которыми легируют стали, образуют твердые растворы замещения. Феррит – мягкая пластичная фаза, имеет следующие механические свойства: $\sigma_в$ = 300 МПа, δ = 40 %, ψ = 70 %, НВ 80...100.

Аустенит (*А*, γ) – твердый раствор внедрения С в Fe_γ, имеет ГЦК – решетку. Растворимость углерода в ГЦК – решетке достаточна большая и достигает 2,14 %. Аустенит пластичен, но более прочен, чем феррит. Твердость аустенита составляет НВ 160...200.

Цементит (*Ц*) – химическое соединение железа с углеродом Fe_3C содержит 6,67 % углерода, имеет сложную ромбическую структуру с плотной упаковкой атомов. При нормальных условиях цементит весьма тверд (НВ 800) и хрупок. При высоких температурах цементит неустойчив и разлагается на аустенит и графит.

Графит – углерод, выделяющийся в свободном состоянии. Имеет гексагональную кристаллическую решетку, мало прочен, мягок (НВ 3).

Диаграмма состояния Fe – C имеет двойственный характер: 1) метастабильная диаграмма Fe – Fe_3C; 2) стабильная диаграмма Fe – C. Для анализа состояния сталей важны обе диаграммы.

Если аустенит быстро переохладить, то вследствие превращения Fe_γ в Fe_α образуется пересыщенный твердый раствор углерода в Fe_α – *мартенсит*. Превращение является бездиффузионным (быстрым), углерод из раствора не выделяется. Мартенсит имеет особую

пластинчатую структуру, его твердость очень высока и достигает HRC 65. Термообработка стали на структуру мартенсита называется закалкой. После закалки на мартенсит сталь становится хрупкой. Мартенсит является неравновесной структурой – при нагреве (отпуске) диффузионная подвижность атомов углерода возрастает и мартенсит начинает перестраиваться в смесь *Ф* + *Ц*. Задача отпуска мартенсита состоит в том, чтобы приблизить мартенсит к равновесной структуре. Чем выше температура отпуска $T_{отп}$, тем ближе структура стали к равновесной, сталь мягче, а ее хрупкость меньше. Различают *низкий* отпуск $T_{отп} < 350...380$ °С, в результате которого получают равновесную смесь *Ф* + *Ц* – тростит отпуска, и *высокий* отпуск $T_{отп} = 400...650$ °С, для которого характерно укрупнение (коагуляция) частиц цементита. Получающуюся в результате высокого отпуска структуру называют сорбитом отпуска. Для сорбита отпуска характерна достаточно высокая ударная вязкость.

Кроме термообработки, упрочнение сталей осуществляется путем их рационального легирования и с помощью термомеханической обработки (ТМО) – сочетанием термообработки с деформационным упрочнением.

Механизмы легирования сталей достаточно сложны и основываются на том, что легирующие элементы изменяют температуры полиморфных превращений железа, влияют на растворимость углерода в аустените и на химический состав сталей. При введении в состав сталей таких легирующих элементов как марганец и никель ГЦК – решетка аустенита становится устойчивой при комнатной температуре. Соответствующие стали называют аустенитными сталями. Эти стали характеризуются не только высокими значениями прочностных характеристик, но и обладают достаточно высокой ударной вязкостью и способностью к деформационному упрочнению. При введении в качестве легирующих элементов хрома, молибдена, вольфрама, ванадия, кремния и др. температурный интервал устойчивости аустенита уменьшается, и соответственно, возрастает температурный интервал устойчивости феррита. Перечисленные легирующие элементы способствуют увеличению предела текучести, предела прочности и твердости сталей.

При деформировании сталей (прокатка, штамповка, ковка и др.) происходит измельчение микроструктуры, увеличивается

плотность дислокаций – структура становится более однородной. Мелкозернистый материал имеет более высокую прочность вследствие большей площади границ между зернами, являющихся естественным барьером для движения дислокаций. Связь между пределом текучести и характерным размером зерен выражается уравнением Холла-Петча [5.2]

$$\sigma_т = \sigma_{т0} + k/\sqrt{\delta},$$

где $\sigma_{т0}$ – характеристический предел текучести монокристалла, k – эмпирическая постоянная, δ – размер зерна.

Зависимость предела текучести на сдвиг $\tau_т$ от плотности дислокаций описывается известным соотношением теории дислокаций

$$\tau_т = \tau_{т0} + \alpha G b \sqrt{N},$$

где $\tau_{т0}$ – предел текучести материала на сдвиг в отожженном состоянии, $\alpha \approx 0{,}5$ – коэффициент, определяемый свойствами металла и типом дислокационной структуры G – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса, N – плотность дислокаций;.

Таким образом, для увеличения прочности сталей следует стремиться к сверхмелкозернистой структуре, насыщенной дислокациями.

Влияние структурного фактора на пулестойкость броневых сталей показано на рис. 5.1 [5.3].

В средствах индивидуальной защиты применяются так называемые противопульные броневые стали высокой твердости, в которых в качестве легирующих элементов могут использоваться хром, никель, молибден, ванадий, кремний. Сложность создания таких сталей обусловлена необходимостью сочетания экстремально высоких значений твердости и прочности, обеспечивающих сопротивление прониканию пули, и достаточного уровня пластичности и вязкости для предотвращения хрупкого разрушения стального бронеэлемента. Как высокотвердые хрупкие, так и вязкие пластичные стали, обладающие невысокой твердостью, характеризуются низкой противопульной стойкостью.

В России основными серийными броневыми сталями, широко применяемыми в противопульной защите, являются среднелегированные стали марок «44», Ц-85, СПС-43, «96». Из новых разрабо-

ток следует отметить стали «56», «44С» (разработчик НИИ стали) и Ф-110 (разработчик ММЗ «Серп и молот»). Прочность этих броне-

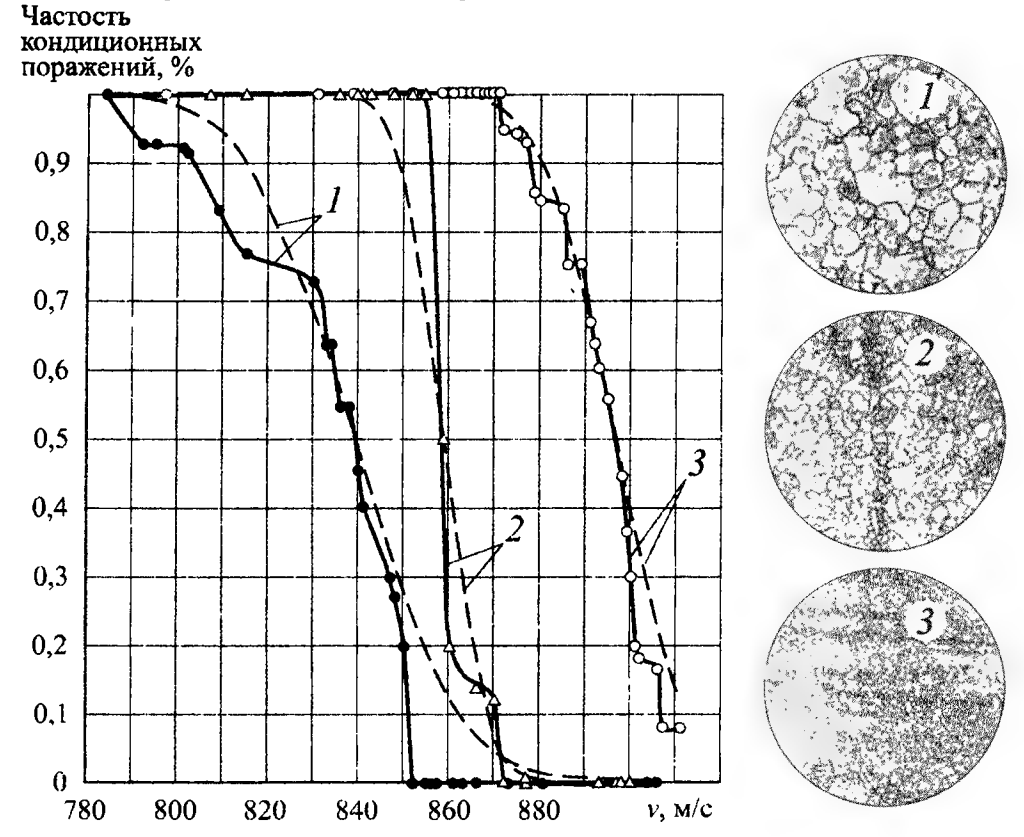


Рис. 5.1. Зависимость противопульной стойкости бронеплиты из стали «46» (толщина 4,7 мм) при обстреле пулей 7Н6 с ТУС калибра 5,45 мм от структуры стали. *1* – закалка, низкий отпуск; зерно 8-9 номера, *2* – высокотемпературная термомеханическая обработка; зерно 10-11 номера, *3* – термомеханическая обработка в интервале перлитного превращения; зерно 13-14 номера. Пунктирная линия – расчетная зависимость; сплошная – экспериментальная.

вых сталей находится в пределах 1750...2300 МПа, твердость 50...58 HRC, относительное удлинение 8...12 % [5.4, 5.5]. Номинальная система легирования, способ получения и механические свойства некоторых высокотвердых броневых сталей, выпускаемых промышленностью, приведены в табл. 5.1 [5.5 – 5.11]. Сравнение механических характеристик броневых сталей с характеристиками среднеуглеродистых сталей показывает, что прочность броневых сталей определяется главным образом содержанием углерода.

Таблица 5.1

Характеристики основных марок отечественных и зарубежных противопульных сталей

Марка стали	Способ выплавки	Номинальная система легирования	Твердость HB/ (HRC)	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение,	Относительное сужение, %	Ударная вязкость a_k 10^{-2}, МДж/м^2
1	Мартен, ЭДП	0,26C-1,4Mn-1,4Si-0,2Mo	388...477	1550	--	-	–	70
77Ш	ЭШП+ТМО	0,35C-1,4Si-1,1Cr-2,4Ni-0,3Mo	477. 522	1900	1600...1700	10 ..12	40 ..50	80
88Ш		0,40C-1,4Si-1,1Cr-2,4Ni-0,3Mo	495...555	2000	–	--	-	70
КВК-37	ЭДП+ВИП или ВДП	0,37C-0,8Mn-2,0Cr-1,0Ni-0,5Mo-0,7W-0,03Nb-0.02B	447...555	2000	–	-	–	–
КВК-42		0,42C-0,8Mn-2,0Cr-1,0Ni-0,5Mo-0,7W-0,03Nb-0,02B	495...578	2100	–	–	–	–
«44»	ЭДП, ЭШП	45ХНМФА	560...610/ (51...52)	2050...2100	1550...1700	8...10	30 ..40	50...60
44С	—	–	(55...57)	2250.. 2350	2000...2100	–	30	–
«46»	—	0,46C-1,0Cr-1,5Ni-0,25Mo-0,14V	(54...56)	2150. .2250	–	–	–	–
«56»	—	0,50C-3Cr-1,7Ni-1,95Mo-0,30V	(57...58)	2250...2350	–	–	–	–
СПС-43	ЭДП	0,43C-1,65Si-1,2Cr-1,3Ni-0,45Mo	444...522	2050	–	–	–	–
«96»	ЭДП	0,48C-1,6Cr-1,0Ni-0,5Mo-0,25V	(52...54)	2100...2150	–	–	–	–
Ц85	ЭДП	0,42C-1,5Si-1,1Cr-1,2Ni-0,45Mo	485...522	2050	–	–	–	–
42	ЭДП, КК	0,42C-1,35Si-1,5Cr-1,6Ni-0,4Mo	485...522	2050	–	–	–	–
Ф110	ЭДП	0,46C-1,3Si-1,5Cr-1,6Ni-0,3Mo	(53. .54)	2100	1900	–	–	–

Окончание табл. 5.1

Марка стали	Метод получения	Номинальная система легирования	Твердость HB/ (HRC)	Предел прочности МПа	Предел текучести МПа	Относительное удлинение %	Относительное сужение %	Ударная вязкость a_k 10^2 МДж/м^2
MARS 300 Франция	ЭДП + внепечное вакуумирование и рафинирование	0,50C-0,8Si-4,0Ni-0,4Mo	578...655/ (56...60)	2180	–	–	–	–
ARMOX600S Швеция		0,45C-0,8Mn-0,8Cr-2,5Ni-0,65Mo-0,002B	570...640/ (56...60)	–	–	–	–	–
ХН-206 Германия	ЭДП, внепечная обработка	35Х2Н2,5МФ	450...500	1700	–	–	–	–
ХН-113 Германия		42ХГМ1Ф	480...530	1900	–	–	–	–
4340 США	–	40ХН2МФ	477 ..514	1900	–	–	–	–

Примечание:
ЭДП – электродуговой переплав
ЭШП – электрошлаковый переплав
ТМО – термомеханическая обработка
ВИП – вакуумно-индукционный переплав
ВДП – вакуумно-дуговой переплав
КК - кислородный конвертор

Применяемые в СИБ бронеэлементы из стали «44» толщиной 5,5 мм обеспечивают защиту при обстреле «в упор» обычными пулями АКМ, АК74 и СВД. Для защиты от пуль с термоупрочненными сердечниками с твердостью, большей 60 HRC, требуется увеличение защищающей толщины бронеэлементов на 15...20 %.

Увеличить пулестойкость броневой стали можно было бы путем увеличения ее твердости. Однако при твердости преграды из гомогенной углеродистой броневой стали большей 55 HRC она становится хрупкой и при обстреле даже обычными стальными пулями поражается по типу пролома или раскола. Для того чтобы избежать этого, необходимо сохранить пластичность стали на уровне ψ = 30 %. В НИИ стали разработана сбалансированная по содержанию углерода и основных легирующих элементов сталь «44С», которая после электрошлаковой переплавки, прокатки и термообработки обладает твердостью 55...57 HRC, прочностью $\sigma_в$ = 2250...2350 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 2000...2100 МПа, относительным сужением ψ = 30 % [5.5]. Как показали испытания, баллистические характеристики этой стали находятся на уровне лучших зарубежных гомогенных броневых сталей марок MARS-300 (Франция), ARMOX-600 (Швеция), 4340 TOD (США). Бронеэлементы из стали «44С» толщиной 6,5...6,6 мм в структуре бронежилета 6Б23 обеспечивают защиту от пуль 7Н22 и 7Н24 с термоупрочненными и твердосплавными сердечниками калибра 5,45 мм.

Влияние твердости стальной брони на толщину бронеэлементов, обеспечивающих защиту от пуль основного стрелкового оружия, показано на рис. 5.2 [5.5].

Одним из возможных путей повышения пулестойкости является создание биметаллической брони с внешним высокотвердым слоем 55...60 HRC и тыльным вязким слоем. Такую броню можно получить, например, сваркой взрывом, пакетной прокаткой или иными способами. В России серийного производства таких сталей пока не освоено, хотя за рубежом они используются достаточно широко.

В таблице 5.2. приведены характеристики некоторых таких сталей.

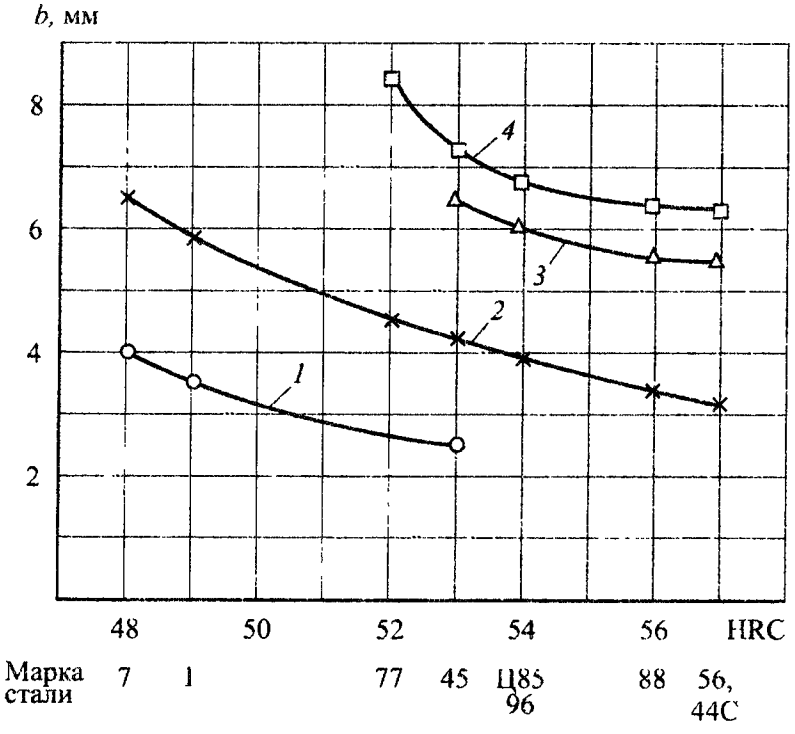


Рис. 5.2. Влияние твердости (HRC) на защищающую толщину стальных бронепластин при испытании различными средствами поражения: о – пистолет ТТ, пуля Пст (v_0 = 415...445 м/с); × – автомат АК-47, пуля ПС (v_0 = 710...725 м/с); ∆ – автомат АК-74, пуля 7Н10 (v_0 = 900±10 м/с); □ – автомат АК-47, пуля ПС с ТУС: (v_0 = 710...725 м/с)

5.2. Механика процесса пробивания металлического бронеэлемента

Механика процесса пробивания металлической преграды существенно зависит от соотношения ее толщины b и диаметра пули или сердечника d. При соотношении $b/d < 1$, характерном для бронеэлементов СИБ, преграда считается тонкой, а сам процесс пробивания – многофакторным, трудно поддающимся теоретическому анализу. Основные закономерности пробивания преград рассмотрены в книгах [5.6, 5.18-5.20].

Таблица 5.2

Характеристики зарубежных гетерогенных броневых противопульных сталей [5.12-5.17]

Марка стали (лицо/тыл)	Номинальная система легирования (лицо/тыл)	Твердость HRC (лицо/тыл)	Предел прочности, МПа (лицо/тыл)	Особенности технологии производства
H-11/ HP-4-0,3 (США)	40Х5М2Ф/ 30ХН9К5М1Ф	58/ 48	2400/ 1900	Пакетная прокатка, соотношение слоев от 40/60 до 60/40
H-11/ D6AC (США)	40Х5М2Ф/ 45ХНМ1Ф	60/ 52	2450/ 1950	Пакетная прокатка по схеме НТМО, соотношение слоев от 40/60 до 60/40
D-11/ SDPX-27	45ХНМ2Ф/ 30ХН3М2Ф	59/ 53	2400/ 2000	То же
MARS DD (Франция)	50СХ5М1,25Ф0,45/ 35Х2Н4М	59/ 45	2100/ 1450	Пакетная прокатка, соотношение слоев 40/60
VZ 43 PZ (Италия)	65ХВ2/ 26Г2С2М	58...64/ 48...54	—	Пакетная прокатка
19735/ 2П (Чехия)	60ХВ2Ф/ 26Г2С2М	58/ 45	—	Сварка взрывом, соотношение слоев 40/60

Взаимодействие сердечника (пули) с преградой начинается с ударно-волновой стадии, которая характеризуется наличием ударных волн и волн разрежения как в преграде, так и в сердечнике. Поскольку сердечник пули имеет, как правило, головную часть в форме усеченного конуса, то длительность начальной стадии мала и возникающие ударные волны быстро затухают. Обычно в задачах конечной баллистики ударно-волновую стадию не рассматривают.

Последующая стадия – стадия проникания сердечника в преграду. В зависимости от соотношения прочностных характеристик материалов сердечника пули и преграды и скорости взаимодейст-

вия различают проникание деформируемых и недеформируемых тел. Проникание стальных неупрочненных сердечников сопровождается интенсивным динамическим деформированием как сердечника, так и преграды. При проникании термоупрочненных сердечников они вплоть до разрушения испытывают относительно малые деформации, что дает основание считать их недеформируемыми. В этом случае контактное давление на границе раздела сердечник – преграда может быть приближенно определено с помощью соотношения

$$p_к = H_д + \kappa \rho_{пр} v_п^2, \qquad (5.1)$$

где $H_д$ – динамическая твердость материала преграды, $H_д \approx 3\sigma_{тд\,пр}$, $\sigma_{тд\,пр}$ – динамический предел текучести материала преграды; κ – коэффициент формы головной части проникающего сердечника: $\kappa = 0{,}5$ для полусферической головной части, $\kappa = \sin^2 \alpha/2$ – для конической головной части с углом при вершине α; $\rho_{пр}$ – плотность материала преграды; $v_п$ – скорость пули.

Сердечник пули при проникании не деформируется и не разрушается, если динамический предел текучести (предел прочности) материала сердечника $\sigma_{тд\,с}$ превосходит контактное давление $\sigma_{тд\,с} \geq p_к$. Из этого неравенства и выражения (5.1) следует соотношение для критической скорости пули $v_{п\,кр}$, при превышении которой сердечник нельзя считать недеформируемым

$$v_{п\,кр} = \sqrt{\frac{\sigma_{тд\,с} - H_д}{\kappa \rho_{пр}}}.$$

Типы пробивания преград как деформируемыми, так и недеформируемыми сердечниками пуль приведены на рис. 5.3. Остановимся более подробно на качественном анализе пробивания преград недеформируемыми ударниками.

Различают три типа пробивания преград недеформируемыми ударниками: выбивание пробки из преграды (рис. 5.3*а*, *1*); пластическое расширение отверстия с преимущественно радиальным течением материала преграды (рис. 5.3*а*, *2*); пластическое деформирование преграды с образованием тыльной выпучины и последующим ее разрушением по типу срезания пробки (для сердечников с

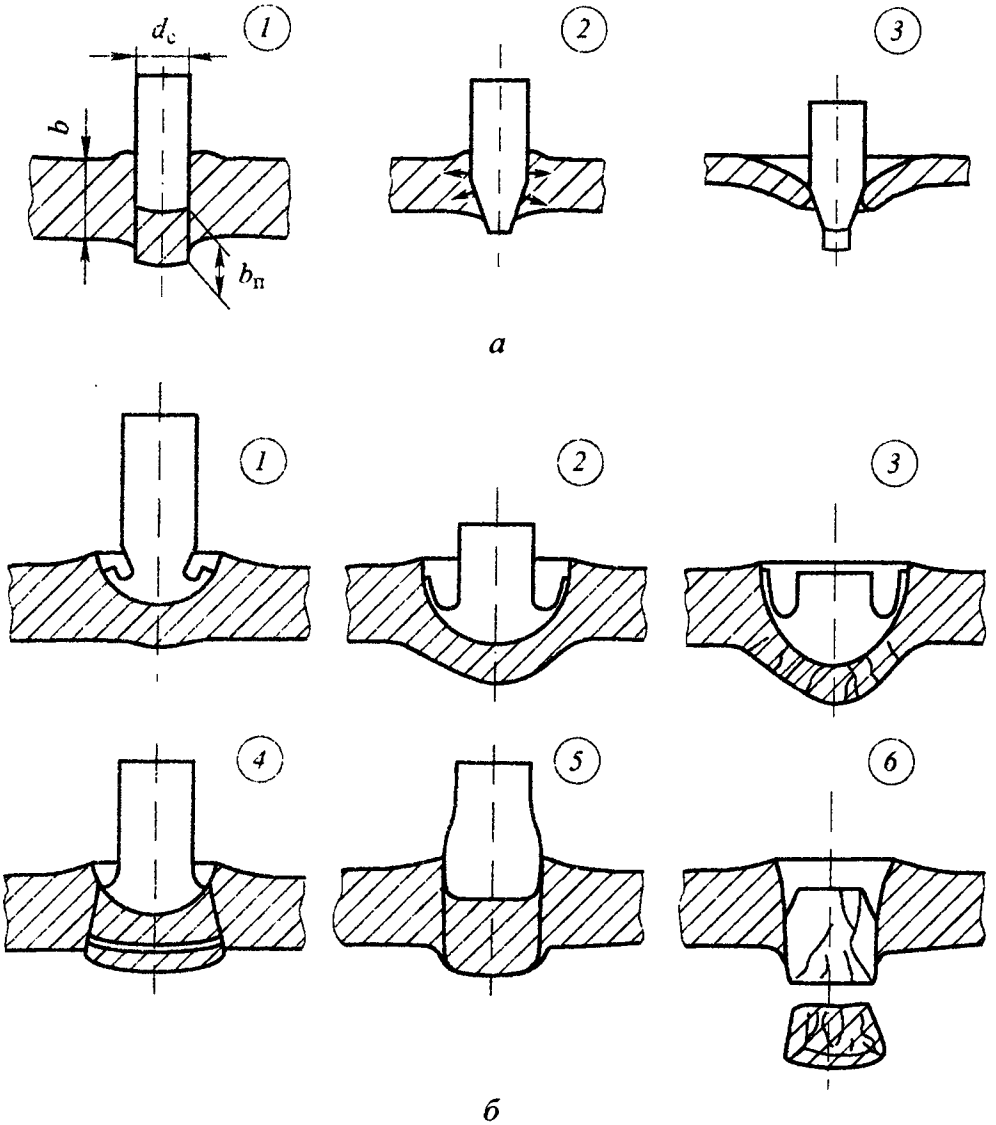


Рис. 5.3. Механика пробивания тонких преград: *а* – пробивание преграды недеформируемым ударником: *1* – выбивание пробки; 2 – пластическое расширение отверстия в преграде; *3* – пластическое деформирование преграды с образованием выпучины; *б* - пробивание преграды деформируемыми ударниками: *1* – внедрение в лицевой слой преграды; *2* – срабатывание ударника и образование выпучины на тыльной стороне преграды; *3* – образование в выпучине трещин; *4* – откол в выпучине и формирование пробки; *5* – выбивание пробки; *6* – разрушение пробки и ударника

плоским торцом) или образования лепестковой пробоины или пластического отгибания закраин (для заостренных сердечников) (рис. 5.3*а*, *3*). На практике эти типы пробивания преград часто совмещаются, например, перед срезанием пробки преграда может деформироваться с образованием тыльной выпучины. Выбиванию пробки, как правило, предшествует внедрение сердечника пули в преграду на определенную глубину.

Рассмотрим составляющие процесса пробивания металлической преграды, завершающей стадией которого является выбивание пробки. Пусть сердечник имеет плоский торец. Начальная стадия взаимодействия сердечника с преградой сопровождается его внедрением в преграду по типу вдавливания пуансона в пластичное полупространство (рис. 5.4). Известно [5.21], что для начала внедрения пуансона в жесткопластичный материал с пределом текуче-

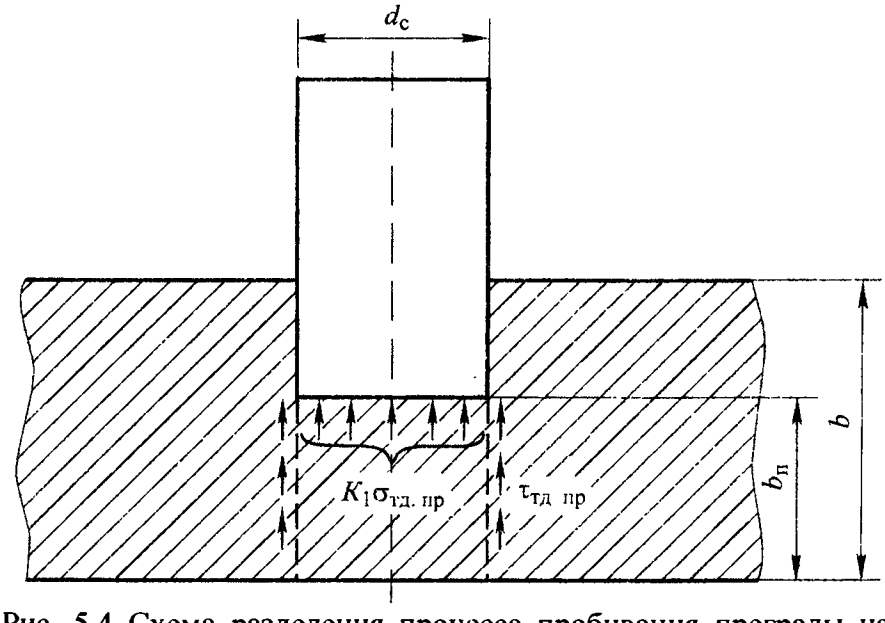


Рис. 5.4 Схема разделения процесса пробивания преграды на стадию внедрения ударника в преграду и стадию срезания пробки

сти $\sigma_{тд\ пр}$ среднее давление на контактной границе $p_к$ должно превосходить $p_к \approx 2{,}6\sigma_{тд\ пр}$. По мере внедрения пуансона давление на контактной границе возрастает до значения $p_к \approx 4\sigma_{тд\ пр}$. В общем случае силу сопротивления внедрению пуансона F_1 можно представить в виде

$$F_1 = K_1 \sigma_{\text{тд пр}} \frac{\pi d_c^2}{4}, \qquad (5.2)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий увеличение предела текучести материала преграды при ее деформировании в стесненных условиях, d_c – диаметр сердечника.

Сопротивление срезанию пробки F_2 высотой $b_п$ и диаметром, равным диаметру сердечника, равно произведению предела текучести материала преграды на сдвиг $\tau_{\text{тд пр}}$ на площадь боковой поверхности пробки

$$F_2 = \tau_{\text{тд пр}} \pi d_c b_п . \qquad (5.3)$$

В условиях плоской деформации $\tau_{\text{тд.пр}} = \frac{\sigma_{\text{тд пр}}}{\sqrt{3}} \approx 0{,}58\sigma_{\text{тд пр}}$. Срезание пробки начнется в момент достижения равенства сил F_1 и F_2. Приравняв (5.2) и (5.3), получим соотношение для определения высоты пробки $b_п$

$$b_п = \frac{\sqrt{3} K_1 d_c}{4}.$$

Поскольку рассматривается пробивание тонких преград, то принимают, что $K_1 = 2{,}7$. Для такого значения K_1 $b_п = 1{,}17 d_c$. Таким образом, внедрение сердечника в преграду будет предшествовать срезанию пробки при условии, что толщина преграды b превосходит $1{,}17 d_c$.

Пластическому деформированию преграды с образованием тыльной выпучины предшествует переход материала преграды в окрестности ударного воздействия в пластичное состояние. Усилие F_3, необходимое для перевода материала в круговой области преграды в пластичное состояние, может быть вычислено как предельная нагрузка для круговой пластины, защемленной по контуру. Согласно [5.22]

$$F_3 = \pi \sigma_{\text{тд пр}} b^2 .$$

Пластический изгиб преграды будет предшествовать срезанию пробки при выполнении неравенства $F_3 < F_2$. Это неравенство выполняется при $b < 0{,}58 d_c$.

Итак, при пробивании преграды недеформируемым ударником в зависимости от соотношения толщины преграды b и диаметра ударника d_c реализуются следующие механизмы:

1) при $b > 1{,}17d_c$ срезанию пробки предшествует внедрение ударника в преграду на глубину $b - 1{,}17d_c$;

2) при $0{,}58d_c \le b \le 1{,}17d_c$ пробивание преграды осуществляется по механизму срезания пробки;

3) при $b < 0{,}58d_c$ пробиванию преграды предшествует образование тыльной выпучины с последующим выбиванием пробки или проколом с образованием лепестков.

Работа A_1 внедрения сердечника на высоту $b - b_п$ равна

$$A_1 = 2{,}7\pi d_c^2 \sigma_{тд\ пр}(b - 1{,}17d_c). \qquad (5.4)$$

Работа срезания пробки A_2 может быть вычислена путем интегрирования силы F_2 по высоте пробки

$$A_2 = \frac{\pi b_п^2 \sigma_{тд\ пр} d_c}{2\sqrt{3}}. \qquad (5.5)$$

Если приравнять кинетическую энергию сердечника работе срезания пробки, то можно получить зависимость для расчета предельной скорости пробития преграды по механизму срезания пробки – формулу Нобля

$$v_{псп} = \sqrt{\frac{\pi\sigma_{тд\ пр}}{\sqrt{3}}}\sqrt{\frac{d_c}{m_c}}\,b$$

При образовании выпучины материал преграды пластически растягивается и изгибается. Для тонких пластин работа формирования выпучины A_3 может быть оценена с помощью соотношения

$$A_3 = \pi\sigma_{тд\ пр} b w\left(\frac{4}{3}w + b\right), \qquad (5.6)$$

где w – максимальный прогиб преграды, или хорошо согласующегося с результатами экспериментов соотношения, приведенного в работе [5.23]

$$A_3 = \frac{\pi}{8}\sigma_{\text{тд.пр}} d_c b\left(d_c + 2\pi b\right). \qquad (5.6а)$$

Определение работы отгибания закраин или лепестков выполнено В. Гольдсмитом в книге [5.24].

При пробивании преграды по механизму пластического расширения отверстия (рис. 5.3а, 2) работа формирования отверстия A_4 может быть определена как произведение предела текучести материала преграды на вытесненный объем

$$A_4 = K_2\sigma_{\text{тдпр}}\frac{\pi d_c^2 b}{4}, \qquad (5.7)$$

где $K_2 \approx 2$ – коэффициент, учитывающий тип напряженно-деформированного состояния материала преграды.

Суммарная работа пробивания преграды зависит от составляющих механизмов пробивания и может быть вычислена как сумма соответствующих этим механизмам работ [5.5 – 5.8]. Приравняв эту сумму к кинетической энергии сердечника, можно определить предельную скорость пробития.

Обзор аналитических формул для вычисления скорости сквозного пробития преград недеформируемыми ударниками дан в работах [5.6, 5.24, 5.25].

В табл. 5.2 приведены усредненные значения предельных скоростей непробития стальных бронепластин из стали «44» различными средствами поражения, полученные в НИИ стали.

Для грубых оценок скоростей сквозного пробития можно использовать формулу Жакоб-де-Марра

$$v_c = 0{,}04K\frac{d_c^{0,75}b^{0,7}}{m_c^{0,5}},\ [d_c] = \text{мм},\ [b] = \text{мм},\ [m_c] = \text{г},\ [v_c] = \text{м/с},$$

где K = 3300 для пуль со стальными неупрочненными сердечниками и K = 3000 для пуль со стальными термоупрочненными сердечниками.

Таблица 5.2

Экспериментальные значения предельных скоростей непробития бронепластин из стали «44»

Средство поражения	Скорость пули, м/с	Толщина преграды, мм
ПС–43 (АКМ), ЛПС (СВД), 7Н6 с ТУС (АК–74)	500	2,65
	600	3,3
	700	4,0
	800	4,9
	900	6,0
ПС–43 ТУС (АКМ)	600	4,65
	650	5,25
	700	6,2
	735	7,0
Пуля М193 со свинцовым сердечником к винтовке М16А1	550	2
	600	2,1
	700	2,4
	800	3,25
	850	4
	900	5,15
	950	7

В иностранной литературе для определения предельных скоростей сквозного пробития преград удлиненными ударниками часто используют формулу Ламберта [5.6]

$$v_c = K_L \left(\frac{l}{d_c} \right)^{0,15} \sqrt{\frac{f(z)\, d_c^3}{m_c}},$$

где K_L – постоянная, характеризует свойства материала преграды; l – длина ударника, см; $z = b/d_c$, $f(z) = z + e^{-z} - 1$; $[m_c]$ = г; $[d_c]$ = см.

Удовлетворительное описание экспериментальных данных табл. 5.2 достигается при K_L = 5000...5500. Необходимо отметить, что формула Ламберта хорошо описывает экспериментальные данные при $z > 1,5$ и распространение ее на более тонкие преграды требует экспериментального подтверждения.

Экспериментальные данные из табл. 5.2 для бронебойной пули ПС-43 с ТУС АКМ хорошо описываются модифицированной фор-

мулой Жакоб-де-Марра с уменьшенным до 0,5 показателем степени при толщине преграды b

$$v_c = 141\frac{d_c^{0,75}b^{0,5}}{m_c^{0,5}},\ [d_c] = \text{мм},\ [b] = \text{мм},\ [m_c] = \text{г},\ [v_c] = \text{м/с}. \quad (5.8)$$

В эту формулу следует подставлять следующие характеристики сердечника пули ПС–43: d_c = 5,85 мм, m_c = 3,56 г.

Пробивание преград деформируемыми ударниками происходит, как правило, либо по «кратерному» механизму (рис. 5.3*б*, *1–3*), сопровождающемуся срабатыванием ударника, либо по механизму выбивания пробки (рис. 5.3*б*, *4–6*) деформирующимся ударником. Для вычисления предельной скорости пробития стальных преград стальными компактными ударниками неправильной формы (осколками) в [5.25] рекомендуется использовать зависимость

$$v_{\text{псп}} = \frac{155b\Phi}{m^{1/3}},$$

где $\Phi = \langle S \rangle / V^{2/3}$ – параметр формы ударника; ⟨S⟩ – среднее значение миделя ударника; V – объем ударника. Для цилиндрического ударника с отношением высоты к диаметру равным единице Ф = 1,38, для сферического ударника Ф = 1,209.

5.3. Определение запреградной скорости

При разработке комбинированной защитной структуры, состоящей из стальной бронепластины и текстильного бронепакета, возможны два подхода. При первом подходе толщина бронепластины выбирается из условия ее непробития средствами поражения, на которые рассчитана. Второй подход заключается в том, что допускается пробивание стальной бронепластины по механизму выбивания пробки, а прошедшие за бронепластину остатки сердечника и выбитая пробка задерживаются текстильным бронепакетом (рис. 5.5). Такой подход позволяет уменьшить толщину стальной пластины на 0,5…1,0 мм, что заметно снижает вес комбинированной защитной структуры. Для того чтобы иметь возможность судить о надежности защиты от воздействия остатков сердечника и

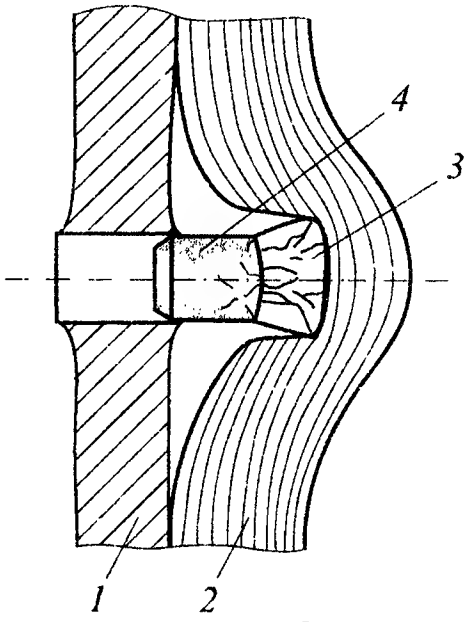


Рис. 5.5. Схема соударения с пробитием бронепластины и удержанием остатков сердечника и выбитой пробки текстильным бронепакетом: 1 – стальная бронепластина; 2 – текстильный бронепакет; 3 – выбитая и разрушенная пробка; 4 – остатки сердечника

выбитой пробки с помощью текстильного бронепакета, необходимо знать их скорость после пробивания стальной бронепластины.

Оценку запреградной скорости остатков сердечника и выбитой пробки можно выполнить с помощью законов сохранения импульса и энергии для неупругого соударения ударника с преградой в соответствии со схемой, приведенной на рис. 5.6. Запреградную скорость определим методом последовательного приближения. Введем следующие обозначения: v_0 – начальная скорость ударника, v – запреградная скорость ударника и пробки, которые движутся совместно, $v_{\text{псп}}$ – предельная скорость сквозного пробития, m_0 – масса ударника, m – масса пробки.

Сначала рассмотрим неупругое соударение ударника с пробкой, когда после пробития ударник и пробка движутся совместно.

$$\begin{aligned} m_0 v_0 &= (m_0 + m)v, \\ \frac{m_0 v_0^2}{2} &= \frac{(m_0 + m)v^2}{2} + \Delta W, \end{aligned} \tag{5.9}$$

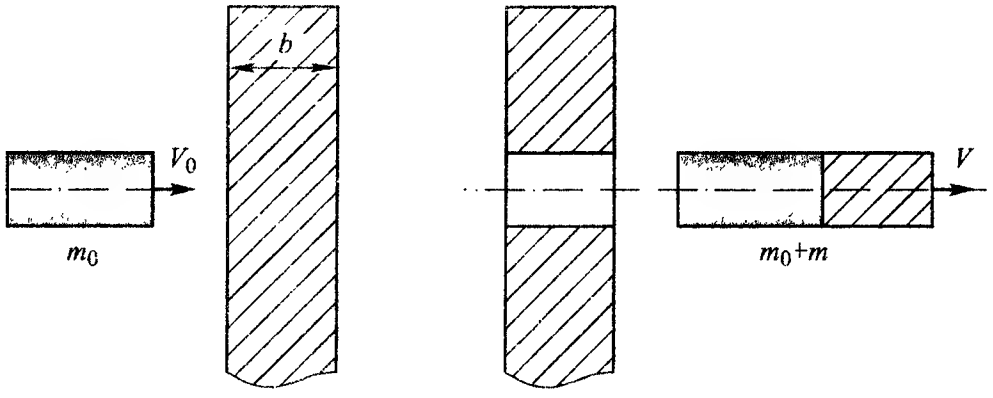


Рис. 5.6. Схема соударения ударника с преградой с выбиванием пробки

где ΔW – потери энергии при соударении. Из (5.9) следуют соотношения

$$v = \frac{m_0}{m_0 + m} v_0,$$

$$\Delta W = \frac{m_0 v_0^2}{2} \left(\frac{m}{m_0 + m} \right).$$

Однако процесс соударения с выбиваемой пробкой не является свободным, часть кинетической энергии ударника затрачивается на выбивание пробки из преграды. Обозначим эту энергию W. Тогда баланс энергий можно записать в следующем виде

$$\frac{m_0 v_0^2}{2} = \frac{(m_0 + m) v^2}{2} + \Delta W + W .$$

При $v_0 = v_{\text{псп}}$ запреградная скорость $v = 0$. Предположим, что потеря энергии ΔW на пластическое деформирование и нагрев ударника и пробки осталась такой же, как и при свободном соударении ударника с пробкой. Тогда для $W_{\text{псп}}$ при $v_0 = v_{\text{псп}}$ нетрудно получить выражение

$$W_{\text{псп}} = \frac{m_0 v_{\text{псп}}^2}{2} \left(\frac{m}{m_0 + m} \right).$$

Теперь, если предположить, что $W = W_{\text{псп}}$ независимо от скорости соударения, то можно получить выражение для запреградной скорости

$$v = \frac{m_0}{m_0 + m}\sqrt{v_0^2 - v_{\text{псп}}^2}\,. \qquad (5.10)$$

Относительную величину остаточной кинетической энергии $W_{\text{ост}}$ ударника и пробки можно определить с помощью соотношения

$$\frac{W_{\text{ост}}}{W_0} = \frac{(m_0 + m)v^2}{m_0 v_0^2} = \frac{m_0}{m_0 + m}\sqrt{1 - \left(\frac{v_{\text{псп}}}{v_0}\right)^2}\,.$$

Особенно эффективно защищающая способность стальной бронепластины проявляется при небольшом превышении скорости ударника v_0 над $v_{\text{псп}}$. Уменьшение запреградной кинетической энергии позволяет удержать текстильным бронепакетом пробку и остатки ударника.

С использованием формулы (5.10) проведены расчеты зависимостей от толщины стальной бронепластины запреградных скорости, кинетической энергии и удельной кинетической энергии выбитой пробки и остатков сердечника при воздействии пули ПС–43 с ТУС (5 класс). Полученные результаты приведены на рис. 5.7. По удельной кинетической энергии запреградное воздействие при толщине бронепластины b = 4 мм эквивалентно воздействию пули пистолета ТТ, а при толщине бронепластины b = 5,7 мм – пули пистолета ПМ. В первом случае для защиты от пробки и остатков сердечника необходима текстильная броня 2-ого класса, а во втором – 1-ого класса.

Исходя из модульного принципа построения защитных структур современных противопульных общевойсковых бронежилетов, основная текстильная броня должна обеспечивать защиту от воздействия осколков (30 слоев ТСВМ ДЖ), а дополнительная металлическая броня должна обеспечивать защиту по 5 классу. Для этого используются бронепластины толщиной 6,5 мм [5.4]. Такие комбинированные защитные структуры фактически не используют защитных ресурсов текстильной брони, что приводит к утяжелению бронежилетов.

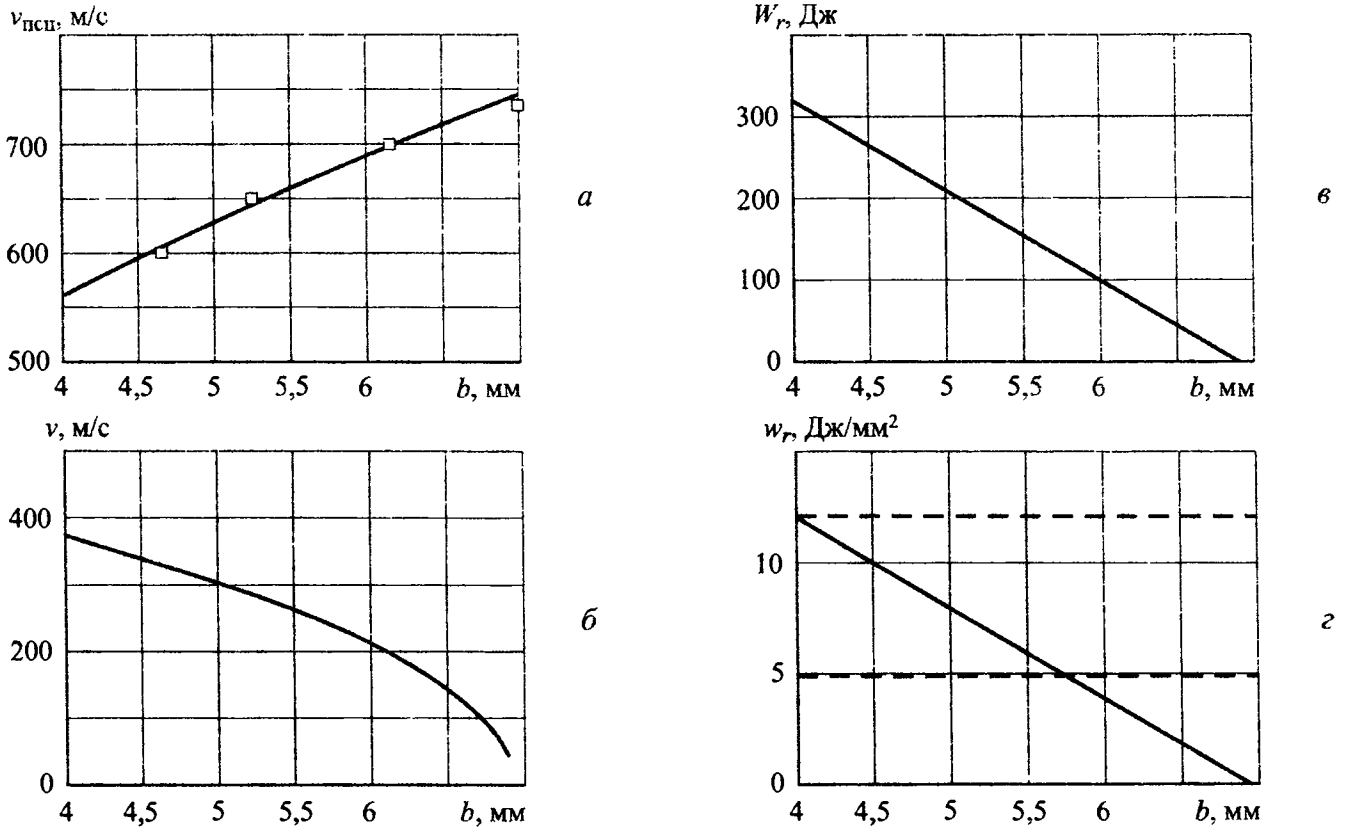


Рис. 5.7. Зависимости от толщины стальной пластины предельной скорости пробития (*а*), запреградных скорости (*б*), кинетической энергии (*в*) и удельной кинетической энергии (*г*) выбитой пробки и остатков сердечника при воздействии пуль ПС-43 с ТУС АКМ. □ – данные экспериментов; ——— – расчет. Пунктирными линиями показаны уровни удельной кинетической энергии, соответствующие пулям пистолетов ТТ и ПМ.

В заключение настоящего раздела приведем обобщение рассмотренного выше подхода к определению запреградной скорости [5.18]

$$v = \begin{cases} 0 \; при \; 0 \le v_0 \le v_{псп}, \\ a\left(v_0^p - v_{псп}^p\right)^{1/p} \quad при \; v_0 > v_{псп}, \end{cases}$$

где $a = m_0/(m_0 + m/3); \quad p = 2 + z/3; \quad z = b/d.$

5.4. Металлическая броня на основе сплавов алюминия и титана

При увеличении толщины противопульной металлической брони сверх $b/d \ge 1{,}5\ldots2{,}0$ исключаются наименее энергоемкие механизмы пробития брони, связанные с тыльным отколом, изгибом и растяжением брони в области воздействия пули, образованием радиальных трещин и последующем разрушении по типу пролома. Предельная скорость сквозного пробития возрастает не только из-за увеличения толщины преграды, но и вследствие более энергоемких механизмов ее пробития. Однако из-за весовых ограничений СИБ увеличение толщины стальной брони сверх 6,0...6,5 мм не представляется возможным.

При использовании вместо стальной брони высокопрочных сплавов титана и алюминия в равной массе толщина титановой брони увеличивается в среднем в 1,7 раза, а алюминиевой – в 2,8 раза, что позволяет надеяться на увеличение противопульной стойкости соответствующих защитных структур. Поскольку известны случаи применения в СИБ высокопрочных сплавов титана и алюминия, в краткой форме рассмотрим их основные свойства.

Титан и титановые сплавы. Титан имеет две полиморфные модификации: низкотемпературная α-модификация имеет ГПУ решетку и устойчива до температуры 882 °С, при более высокой температуре устойчива β-модификация, имеющая ОЦК решетку. Наличие полиморфизма создает предпосылки для улучшения свойств титановых сплавов с помощью легирования и термообработки. По своему кристаллическому строению титановые сплавы делятся на однофазные с α-структурой, двухфазные с (α+β) – структурой и однофазные с β-структурой.

Титановые сплавы с α-структурой ВТ5, ВТ5-1, содержат 5% алюминия, являющегося α-стабилизатором, а также 2,5% олова. Эти сплавы имеют средний уровень прочности, не подвергаются термообработке и обладают очень высокой коррозионной стойкостью.

Двухфазные титановые сплавы с (α+β) структурой ВТ6, ВТ8, ВТ14, ВТ16 и др. содержат в определенной пропорции α- и β-стабилизаторы: алюминий, ванадий, молибден, хром, железо и др. Эти сплавы обладают хорошим сочетанием технологических и механических свойств: они упрочняются при термообработке до $\sigma_в$ = 1,5..1,8 ГПа. Титановые сплавы характеризуются относительно невысоким модулем упругости 112 ГПа.

О баллистической стойкости тонких пластин из титанового сплава Ti-6Al-4V (330 НВ, $\sigma_в$ = 895 МПа), при воздействии бронебойных пуль со стальным и свинцовым сердечниками можно судить по зависимостям 50%-ной скорости пробития от толщины пластин, приведенным на рис. 5.8 [5.26].

Однофазные β-сплавы не имеют широкого промышленного применения, так как для получения устойчивой β–структуры сплавы должны быть легированы большим количеством β-стабилизаторов: V, Mo, Nb, Ta – дорогих и дефицитных материалов, к тому же значительно повышающих плотность сплавов. В настоящее время применяются так называемые псевдо-β-сплавы типа ВТ15, содержащие до 20% V, Mo, Cr.

В СИБ применяются титановые сплавы с (α+β)–структурой (ВТ14, ВТ23 и др.) и однофазные псевдо-β-сплавы (ТС6) [5.4]. Также как и для стальной брони, большую роль в улучшении механических свойств титановой брони играет измельчение микроструктуры.

Необходимо отметить, что из-за низкой теплопроводности титановые сплавы при интенсивном динамическом нагружении имеют склонность к локализации сдвиговых пластических деформаций – образованию полос адиабатического сдвига. Поэтому доминирующим механизмом пробития титановых бронепластин является срез и выбивание пробки [5.27].

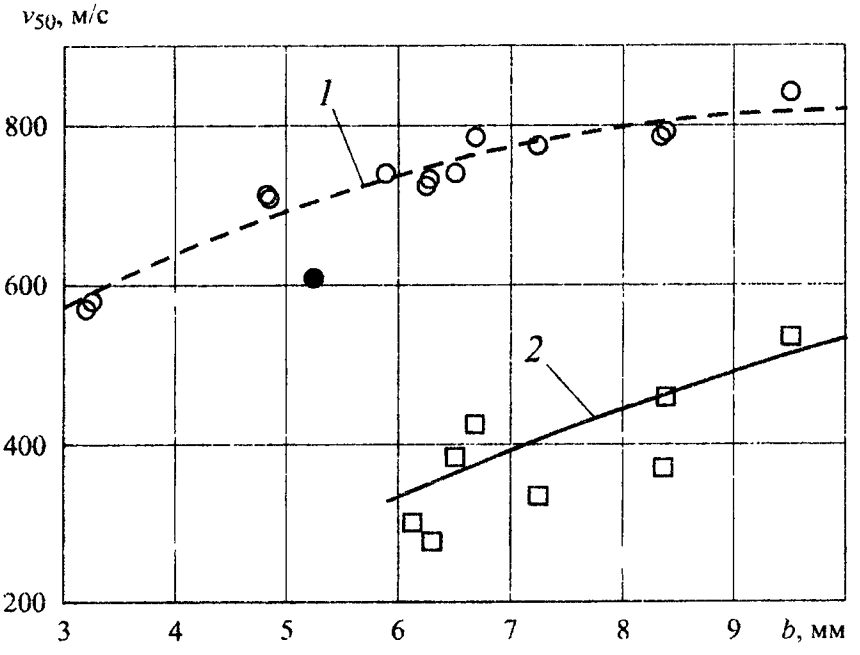


Рис. 5.8. Зависимости 50 %-ной скорости пробития титановых пластин от их толщины: 1 –пуля М193 со свинцовым сердечником, калибр 5,56 мм; 2 – бронебойная пуля АР М2 со стальным сердечником, калибр 7,62 мм

Систематическое использование титановых сплавов для изготовления бронеэлементов средств индивидуальной бронезащиты началось еще в 1970-х годах [5.27]. В 1980-х годах была разработана серия бронежилетов 6Б5, в которых использовали титановую броню из ВТ14 в противоосколочных бронежилетах (толщина пластин 1,25 мм) и из ВТ23 в противопульных бронежилетах (толщина пластин 6,5 мм). В современных общевойсковых противопульных бронежилетах толщина титановой брони увеличена до 9,5 мм. При этом подпирающий текстильный бронепакет состоит из 70 слоев ткани ТСВМ-ДЖ. Наряду с разработкой титановой брони для бронежилетов НИИ стали разработал серию комбинированных бронешлемов из цельнотянутого титана массой до 2,1 кг, обеспечивающих защиту по 2-ому классу.

Алюминиевая броня. Алюминий имеет ГЦК–решетку. В чистом виде он характеризуется низкой прочностью и малой твердостью, поэтому в качестве самостоятельного броневого материала не используется. Но сплавы алюминия с магнием, цинком, медью и

некоторыми другими металлами обладают уже достаточно высокими механическими характеристиками, обеспечивающими приемлемый уровень противопульной стойкости. Высокопрочные алюминиевые сплавы В95, В93, В96Ц1 обладают пределом прочности 600...700 МПа, твердостью НВ 145...160 и модулем упругости 72 ГПа. Из алюминиевой брони АБТ-101 и АБТ-102 изготовляют корпуса боевых машин пехоты и десанта.

В противопульных СИБ до недавнего времени алюминиевая броня находила ограниченное применение. Известны образцы бронежилетов, в которых алюминиевые сплавы используются в качестве антитравматических вставок или для защиты от холодного оружия [5.28]. Однако в настоящее время алюминиевая броня начинает все шире применяться и в бронежилетах, и в шлемах, и в других средствах индивидуальной бронезащиты. Работами ОАО НИИ Стали показано, что этот материал дает заметный выигрыш по массе в сравнении с равностойкой стальной броней при использовании его в защитных структурах 2 класса защиты по ГОСТ Р-50744-95 [5.29]. Бронежилеты с алюминиевыми бронеэлементами (Тантал-2) и бронешлемы с алюминиевой основой (Рысь и Урал) в настоящее время приняты на вооружение МВД РФ.

Сравнительные данные по поверхностной плотности бронезащиты из различных материалов от пистолетных пуль приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Поверхностные плотности бронезащиты из различных материалов от пистолетных пуль

Средство поражения	Материал бронезащиты	Поверхностная плотность, кг/м^2
ПСТ, 9 мм, ПМ, 1 класс защиты, v = 315...320 м/с	Полиэтиленовая панель из UD-66	2,1
	Ткань СВМ	2,3
	Титановая броня	9,0
	Алюминиевая броня	11,2
	Стальная броня	17,2
ПСТ, 7,62 мм, ТТ 2 класс защиты, v = 415...445 м/с	Полиэтиленовая панель из UD-66	6,6
	Ткань СВМ	9,2
	Титановая броня	13,5

Окончание табл. 5.3

Средство поражения	Материал бронезащиты	Поверхностная плотность, кг/м^2
ПСТ, 7,62 мм, ТТ 2 класс защиты, v = 415...445 м/с	Алюминиевая броня	16,8
	Стальная броня	17,4
	Комбинированная структура: стальная броня + ткань	13,0

Как следует из анализа этих данных, при обстреле пистолетными пулями по нормали к поверхности бронеэлемента высокопрочные титановые и алюминиевые сплавы преимуществ перед текстильной броней не имеют. По стоимости листовой прокат из высокопрочных алюминиевых сплавов в 5 раз, а титановых в 25 раз превышает стоимость листового проката из бронестали [5.30]. Титановая броня заметно легче равных по стойкости алюминиевой и стальной брони.

ЛИТЕРАТУРА

5.1. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1978.

5.2. Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение. Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1975.

5.3. Кудрявцева Н.С., Легкодух А.М., Матевосян А.П., Фанасова Е.И. Подходы к созданию особо прочных сталей для противопульной брони.// Труды третьей Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности», С.-Петербург, НПО «Спецматериалы», 2000.

5.4. Концептуальные основы создания средств индивидуальной защиты. Часть I. Бронежилеты. / Под общ. ред. В.Г. Михеева. М.: Межакадемическое изд. «Вооружение. Политика. Конверсия», 2003.

5.5. Гладышев С.А., Григорян В.А., Егоров А.И., Заря Н.В. Сверхвысокопрочная броневая сталь марки «44С» // Девятая международная научно-практическая конференция «Новейшие тенденции в области конструирования и применения баллистических материалов и средств защиты». Москва, ОАО НИИ стали, 2007.

5.6. Частные вопросы конечной баллистики / Под ред. В.А. Григоряна.— М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.

5.7. Технические условия ТУ 14-1-4305-96. Лист стальной броневой из стали марки Ц-85. М: НТЦ ЦНИИ Чермет, 1987.
5.8. Сильников М.В., Кузин А.Ю., Кочетова Н.С., Петров А.В. Тонколистовая броневая сталь марки СПС-43. // Труды второй Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности», С.Петербург, 1999
5.9. Nahme H., Lach E. Dynamic behavior of high strength armor steels.// J. Phys. IV, v.7, Coll.C3, Suppl. J. Phys. III, 1997.
5.10. Steel armor of Swedish Steel Oxelosung Co.// JANE's AFV Retrofit Systems 1992-1993. (5-th ed.), 1994.
5.11. Rapalski E., Frank K., Leavy R., Keele M. Armor steel hardness influence on kinetic energy penetration.// Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Ballistics, Jerusalem, Israel, 1995, v.1.
5.12. Armor plates families. General characteristics. Creusot-Loire Industrie, Division mecanique specialisee, Jan. 1985.
5.13. Rolc S., Buchar J. On the penetration process in steel laminates.// Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Ballistics, San Francisco, USA, 1996, v.3.
5.14. National Defence, v.51, №325, 1974.
5.15. Kula E. Azrin M. Thermomechanical processing of ferrous alloys.// Adv. Deformation Process Proc 21-st Sagamore Army Materials Res. Conf., New York, 1974.
5.16. Briggs B. Thermal-mechanically processed low-alloy steel.// Патент США №3751307, 1972.
5.17. Briggs B. Dual property steel armor.// Патент США № 3694174, 1971.
5.18. Зукас Дж. А., Николас Т., Свифт Х.Ф. и др. Динамика удара. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985.
5.19. Сагомонян А.Я. Динамика пробивания преград. М.: Изд-во Моск. университета, 1988.
5.20. В.М. Фомин, А.И. Гулидов, Г.А. Сапожников и др. Высокоскоростное взаимодействие тел . – Изд-во СО РАН, 1999.
5.21. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1977.

5.22. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в 3-х томах. Т. 1 // Под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968
5.23. Cimpoeru S.J. Analytical modeling of the perforation of multilayer metallic targets by fragment simulating projectiles // Proceedings of the Twentieth International Symposium on Ballistics, Orlando, USA, 2002.
5.24. Гольдсмит В. Удар. М.: Стройиздат, 1965.
5.25. Физика взрыва // Под ред. Л.П. Орленко. В 2 т. Т.2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.
5.26. Burkins M. Ballistic performance of Thin Titanium Plates // Proceedings of the Twenty Third International Symposium on Ballistics – Tarragona, Spain, 2007.
5.27. Петрова Э.Н., Яньков В.П. Титановые сплавы как броневые материалы для средств индивидуальной бронезащиты // Девятая международная научно-практическая конференция «Новейшие тенденции в области конструирования и применения материалов в средствах защиты». – М., ОАО НИИ стали, 2007.
5.28. Арцруни А.А., Петрова Э.Н., Степанов Е.И. и др. Алюминиевая броня для средств индивидуальной защиты // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. «Композиционные неметаллические материалы в машиностроении».– 2005. – Вып. 3–4.
5.29. Григорян В.А., Петрова Э.Н., Хромушин В.А., Яньков В.П. Исследование возможности и путей создания перспективных материалов для средств индивидуальной защиты бойца.// ВОТ, серия 16, 2003 г.
5.30. Сильников М.В., Химичев В.А. Средства индивидуальной бронезащиты. Учебное пособие. – СПб.: Фонд «Университет», 2000.

Глава 6. КЕРАМИЧЕСКАЯ БРОНЯ

6.1. Керамические бронематериалы

Эффективная защита от высокоэнергетических средств поражения с высокой проникающей способностью – бронебойных винтовочных пуль с термоупрочненными сердечниками (ТУС) (6 и 6а классы защитных структур по ГОСТ Р 50744-95) немыслима без использования в качестве элемента защитной структуры керамики – высокотвердого, но очень хрупкого материала.

К керамикам относят материалы, получаемые спеканием или горячим прессованием порошков минеральных веществ. Для изготовления бронеэлементов используют оксидную, карбидную, боридную, нитридную и смесевые керамики. Обычной технологией получения керамических изделий является спекание при высокой температуре предварительно отпрессованных заготовок. С помощью такой технологии получают, например, корундовую керамику (Al_2O_3). Если при спекании происходят химические превращения, то такую керамику называют реакционноспеченной. Такова, например, керамика на основе карбида кремния SiC. Спеченные керамики характеризуются небольшой пористостью, ухудшающей ее механические свойства. Малопористое состояние керамических изделий с высоким уровнем механических свойств может быть достигнуто путем горячего прессования исходных порошков при высокой температуре. Например, с помощью горячего прессования при 2200 °С получают керамику на основе карбида бора B_4C.

Структурно керамика состоит из кристаллической, аморфной фаз и пор. Свойства этих фаз, а также пористость определяют механические свойства керамических бронеэлементов. Чем меньше размеры кристаллических частиц, чем меньше в керамике содержится аморфной фазы, и чем меньше пористость, тем выше прочность и твердость керамики.

Основные механические характеристики керамических материалов, наиболее часто применяемых в многослойных защитных структурах СИБ, приведены в табл. 6.1. В этой же таблице для сравнения приведены те же данные для сталей, из которых изготавливают сердечники стальных пуль (сталь 10), ТУС (сталь У12) и среднеуглеродистой среднелегированой стали 45Х. Данные взяты из [6.1-6.4]. В отличие от стали, керамика имеет в 2…3 раза меньшую плотность и, в среднем, в 2 раза больший модуль упругости, что приводит к высоким значения скорости распространения продольных упругих волн 10…12 км/с.

Таблица 6.1

Физико-механические характеристики керамик, применяемых в СИБ, и сталей, из которых изготавливают сердечники пуль

Материал	Плотность ρ, г/см^3	Модуль упругости E, ГПа	Начальная твердость керамики, твердость стали	Коэффициент Пуассона, μ	Продольная скорость звука $c_к$, км/с	Коэффициент трещиностойкости K_{1C}, МН·м$^{-3/2}$	Удельная работа разрушения, Дж/м^2	Предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$, МПа
Корунд Al_2O_3	3,9	407	HV 18,0 (HRA 90)	0,22	10,4	3,5 ±0,3	180… 500	220 ±20
Карбид бора B_4C	2,4… 2,48 (max 2,52)	475	До HV 28 (HRA 96)	0,2	12,4	4,0 ±0,3	260	350 ±20
Карбид кремния SiC	3,0	350±20	HV 20 (HRA 93)	0,17	10,5	3,2 ±0,3	240	440 ±20
Сталь 10	7,86	206	до НВ 143	0,3	~ 6	–	235 ×10^4	$\sigma_в$~ 400 ГПа
Сталь У12	7,83	207	до HRC 68	0,3	–	18	200 ×10^3	до 1600
Сталь 45Х	7,82	206	до НВ 500	0,3	–	120	550 ×10^3	до 1500

Обращает на себя внимание чрезвычайно высокая твердость керамик в сочетании с низкой ударной вязкостью. Именно высокая твердость керамик определяет защищающую способность керамической брони. Для того чтобы понять это, проанализируем силовое взаимодействие деформируемых или разрушающихся (срабатывающихся) ударников с высокотвердой преградой.

6.2. Баллистическая стойкость керамической брони

Процесс ударного взаимодействия ударников с преградой разделяется на очень короткую начальную ударно-волновую стадию и последующую достаточно длительную стадию динамического деформирования и (или) проникания ударника в преграду без выраженных ударно-волновых процессов. Ударно-волновая стадия взаимодействия характеризуется наличием интенсивных ударных волн и волн разрежения как в преграде, так и в ударнике. Максимальное давление $p_{\text{УВ}}$ на границе раздела ударник – преграда, развиваемое на ударно-волновой стадии, может быть оценено с помощью соотношения

$$p_{\text{УВ}} = \frac{(\rho c)_{\text{пр}}(\rho c)_{\text{уд}}}{(\rho c)_{\text{пр}} + (\rho c)_{\text{уд}}} v_{\text{уд}},$$

где ρ – плотность материала; c – скорость звука; $v_{\text{уд}}$ – скорость ударника; подстрочные индексы пр. и уд. относят соответствующие величины к преграде и ударнику. Для случая взаимодействия стальных ударников с корундом с использованием данных из табл. 6.1 в диапазоне скоростей 500...1000 м/с получим $p_{\text{УВ}}$ = 10...20 ГПа. Поскольку Гюгониевский предел упругости малопористой корундовой керамики плотностью 3,9 г/см^3 достигает ~ 90 ГПа [6.5], то ударные волны в указанном диапазоне скоростей являются упругими. Длительность ударно-волновой стадии $t_{\text{УВ}}$ невелика и для цилиндрического ударника с плоским торцом диаметром $d_{\text{уд}}$ по порядку величины составляет $d_{\text{уд}}/(2c_{\text{пр}})$. Так при воздействии ударника диаметром 7,62 мм по преграде из корундовой керамики $t_{\text{УВ}} \approx$ 0,3...0,4 мкс. По истечении этого времени ударная волна быстро затухает. Если ударник заострен, что характерно для сердечников пуль, то выделить начальную ударно-волновую ста-

дию достаточно сложно, так как диаметр начальной области контакта мал и возникающие в начальный момент времени ударные волны быстро затухают как из-за воздействия тыльных волн разгрузки, так и вследствие сферической формы фронта ударной волны.

По причине малой длительности по сравнению с полным временем ударно-проникающего взаимодействия ударно-волновую стадию в задачах конечной баллистики обычно не учитывают. Однако на этой стадии при схождении радиальной волны разгрузки, в которой материал преграды приобретает радиальную составляющую скорости, направленную от оси симметрии ударного взаимодействия, из-за невысокой прочности керамики на растяжение возможно ее разрушение в небольшой области непосредственно под ударником.

На последующей стадии динамического взаимодействия ударника с жесткой преградой контактное давление $p_к$ можно оценить с помощью двучленной зависимости [6.4, 6.6], учитывающей как прочностные свойства, так и давление скоростного напора материала ударника

$$p_к = \sigma_{тд} + k \cdot \rho_{уд} \cdot v_{уд}^2$$

где $\sigma_{тд}$ – динамический предел текучести материала ударника; k – коэффициент формы (при растекании ударника вдоль плоской поверхности преграды $k = 0{,}5$). Расчеты показывают, что при воздействии по преграде стальных пуль, имеющих $\sigma_{тд} = 0{,}5\ldots1{,}5$ ГПа в скоростном диапазоне $v_{уд} = 500\ldots1000$ м/с, $p_к$ по величине не превосходит 4,5 ГПа. Сравнение возникающего контактного давления с твердостью керамик $H_к$ показывает, что оно значительно ниже приведенных в табл. 6.1 значений твердости по Виккерсу HV, изменяющейся в пределах 15...28 ГПа. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что в начале динамической стадии взаимодействия проникания даже термоупрочненных сердечников бронебойных пуль в керамику происходить не может – керамическая преграда ведет себя подобно абсолютно жесткой преграде. Торможение пуль на «жесткой» керамической преграде сопровождается разрушением (срабатыванием) их головной части и снятием рубашки (рис. 6.1*а, б*). Такой характер начальной фазы взаимодействия бронебойных пуль с керамической преградой имеет прямое

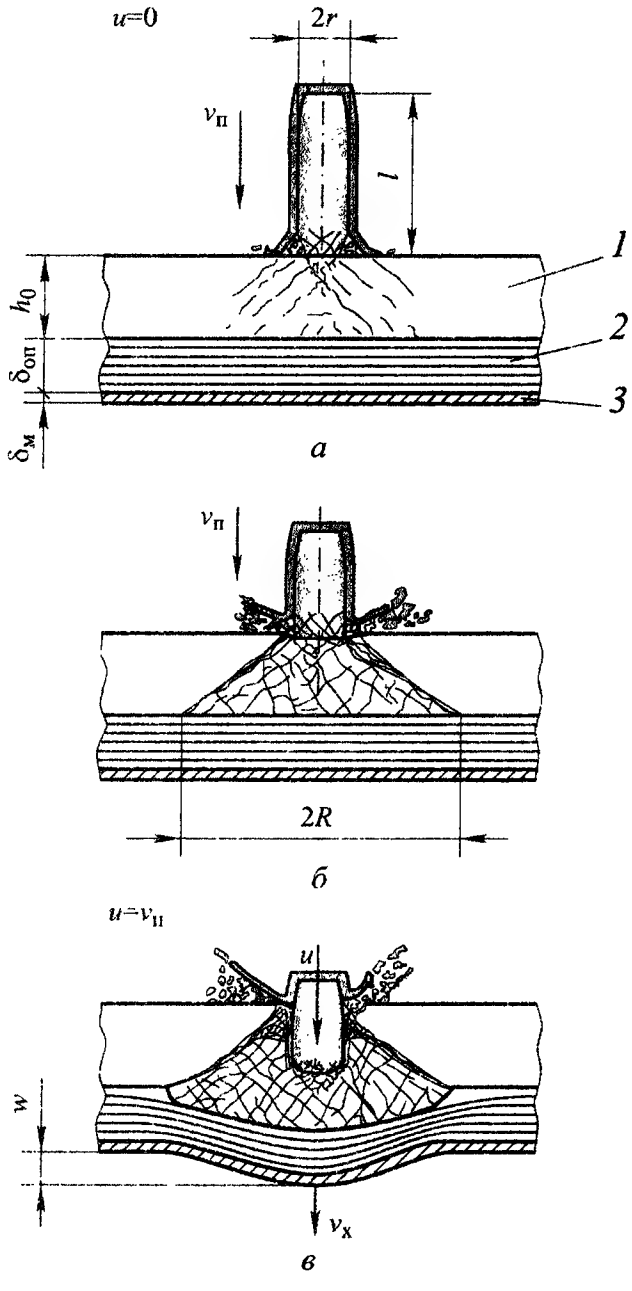


Рис. 6.1. Взаимодействие пули с трехслойной преградой с внешним керамическим слоем: *а* – срабатывание пули на «жестком» керамическом слое; *1* – керамический слой; *2* – органо-пластиковый слой; *3* – металлический слой; *б* – формирование разрушенного керамического конуса; *в* - проникание остатков сердечника в разрушенную керамику, деформирование подложки и образование тыльной выпучины.

экспериментальное подтверждение, полученное путем рентгенографирования процесса взаимодействия бронебойных пуль с корундовой керамикой (рис. 6.2) [6.7].

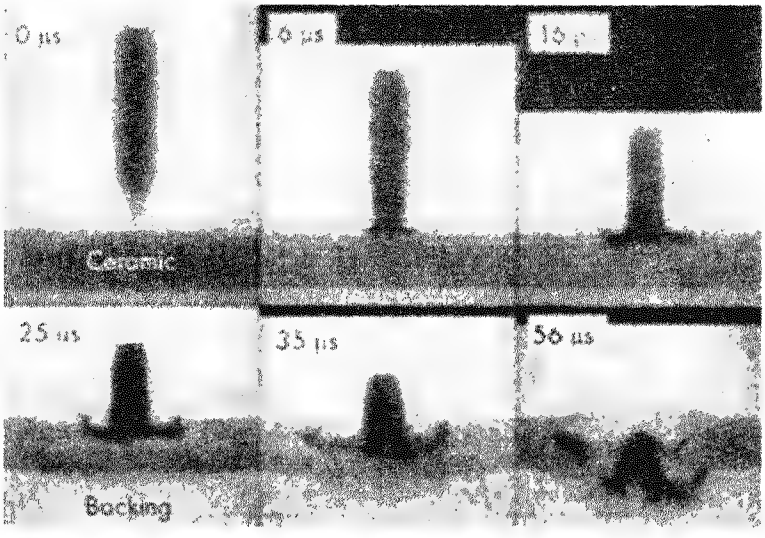


Рис. 6.2 Рентгеноимпульсная регистрация процесса взаимодействия бронебойной пули калибром 7,62 мм с двухслойной преградой, состоящей из керамического слоя и подложки

Твердость керамики $H_к$, подвергнутой высокоскоростному удару, вследствие ее разрушения в процессе волнового формирования поля сдвиговых и растягивающих напряжений, характерного для контактных задач, быстро уменьшается. Но до тех пор, пока твердость разрушающейся керамики превосходит контактное давление, проникания пули в нее не происходит. Условие жесткости преграды $H_к > p_к$ выполняется в течение некоторого времени $t_р$. По истечение этого времени при $t > t_р$ начинается проникание частично сработавшейся пули в разрушенную керамику и продолжается до тех пор, пока давление на контактной границе превосходит твердость разрушенной керамики $p_к > H_к$ (рис. 6.1*в*). В момент времени $t = t_{пр}$ давление на контактной границе вследствие торможения пули становится равным твердости разрушенной керамики $p_к = H_к$ и проникание пули в нее прекращается. Режимы проникания определяются взаимным положением зависимостей от времени твердости керамики $H_к(t)$ и контактного давления $p_к(t)$ (рис. 6.3).

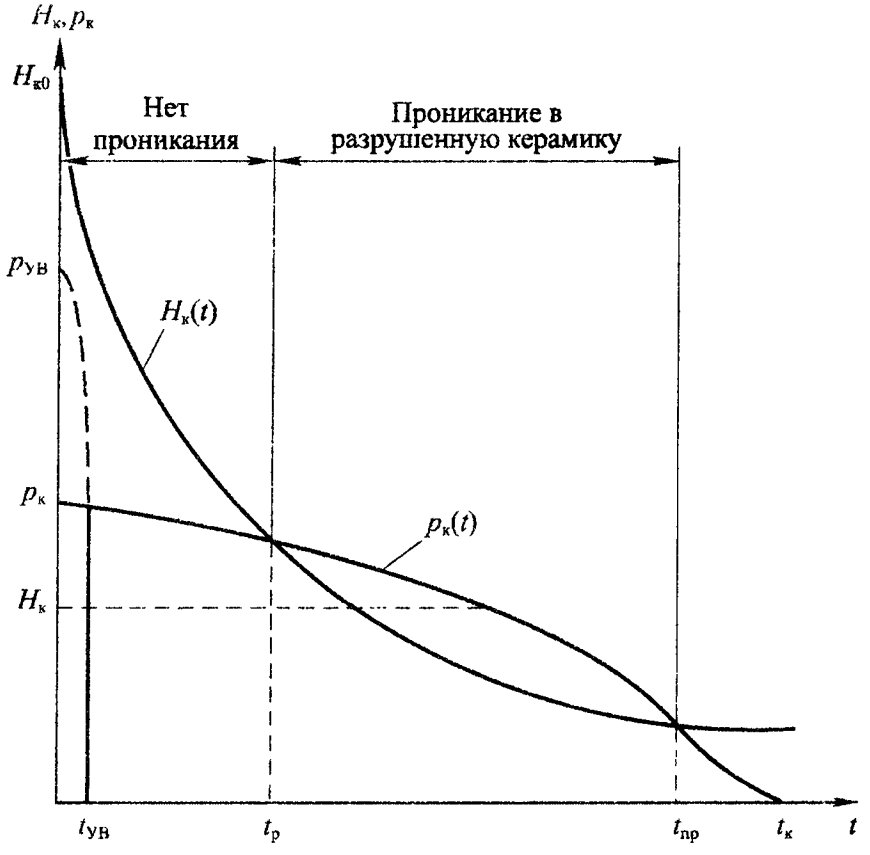


Рис. 6.3. Качественные зависимости твердости керамики и контактного давления от времени в процессе проникания ударника в керамическую преграду.

Вид зависимости $H_к(t)$ определяется граничными условиями, типом и кинетикой разрушения керамики, конфигурацией возникающих трещин. Все это даже для простой геометрии ударного воздействия на полупространство упруго-хрупкого материала (динамическая контактная задача Герца) исследовано в недостаточной для практических приложений степени [6.8-6.10]. Поэтому говорить о возможности построения зависимости $H_к(t)$ на основании теоретических представлений механики разрушения еще рано. Некоторые особенности разрушения керамики в составе защитных структур при ударном воздействии пуль достаточно подробно исследованы экспериментально [6.4, 6.7, 6.11–6.16]. Одним из результатов, важных для дальнейшего количественного анализа процесса взаимодействия пуль с преградами, является установление

конфигурации области разрушенной керамики. Она имеет форму усеченного конуса, обращенного большим основанием к подложке и диаметром меньшего основания, незначительно превосходящим диаметр области воздействия. Угол раствора конуса для исследованных керамических материалов изменяется в пределах $2\alpha=110°...130°$ (рис. 6.1*в*). Наличие расходящихся конических трещин в локально нагруженной упруго-хрупкой преграде характерно для динамических контактных задач Герца [6.9, 6.10]. Эти трещины возникают вдоль границы, разделяющей внутреннюю сжатую и внешнюю растянутую радиальными напряжениями области материала преграды.

О состоянии керамики внутри конуса можно судить по фоторегистрации тыльной поверхности керамической пластины, приведенной на рис. 6.4 [6.16]. Корундовая пластина толщиной 5 мм с поперечными размерами 60×60 мм пробивалась имитатором осколка по стандарту НАТО STANAG 2920 диаметром 6,1 мм и массой 1,1 г, летящим со скоростью 650 м/с. На фотографируемой поверхности четко выделяется основание конуса разрушенной керамики, на котором можно выделить две зоны: центральная зона раздробленной керамики диаметром 20...25 мм (~4 диаметра ударника) и периферийная зона с регулярными радиальными и круговыми трещинами диаметром 40...45 мм. От периферийной зоны, которая разрушена на более крупные фрагменты, отходят радиальные трещины. Наши наблюдения показывают, при увеличении толщины керамического слоя до 10...15 мм размеры фрагментов увеличиваются. Фотографии фрагментов и вид поверхности разрушения корундовой керамики приведены на рис. 6.5.

Разрушенную керамику на начальной стадии формирования и ускорения конической области можно уподобить пористому телу, состоящему из тесно прилегающих друг к другу керамических фрагментов и обладающему определенной сдвиговой прочностью вследствие трения между фрагментами, особенно в условиях действия сжимающих напряжений. Если сдвиговые напряжения превышают силы трения, то возможно пластическое деформирование разрушенной керамики, которое может сопровождаться как дополнительным разрушением керамических фрагментов, так и увеличением объема разрушенной керамики вследствие их разворота. Все

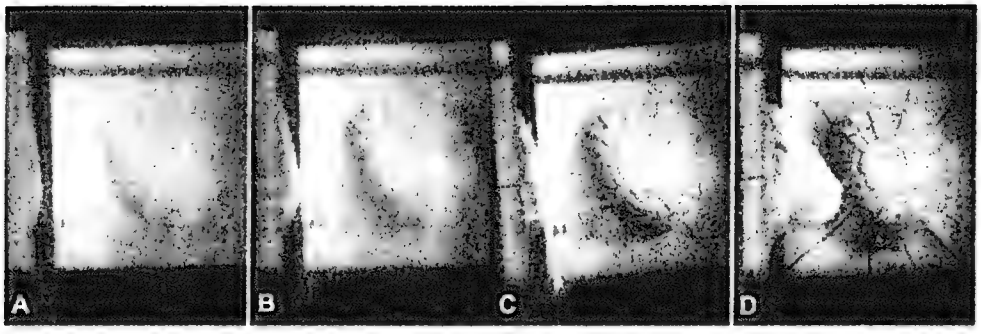


Рис. 6.4. Кадры фоторегистрации тыльной поверхности корундовой пластины. Слева на каждом кадре показан вид сбоку. Кадры A, B, C, D соответствуют времени после удара 24, 34, 44, 64 мкс [6.16].

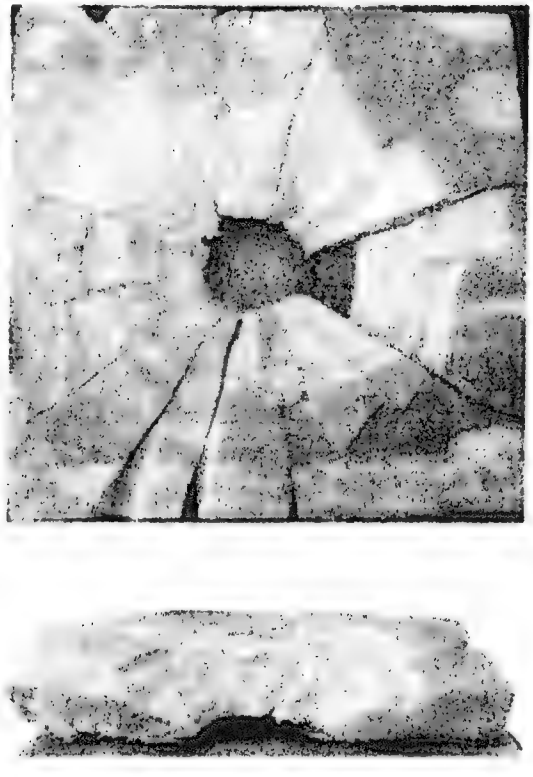


Рис. 6.5. Характер разрушения керамического слоя из корунда при воздействии пули Б-32 на комбинированную керамикоорганопластиковую броню

это приводит к тому, что, во-первых, проникание остатков пули в разрушенную керамику сопровождается не только инерционным, но и прочностным сопротивлением, во-вторых, разрушенный керамический конус под действием сил взаимодействия с проникающей пулей ускоряется как твердое тело и включает во взаимодействие последующие слои подложки еще до подхода к ним пули.

Наличие остаточной прочности у разрушенной керамики, находящейся в сжатом состоянии, является важным дополнительным фактором торможения остатков пули и характеризует качество керамики как баллистического материала. В некоторых работах, например [6.4], разрушенную керамику уподобляют сыпучей среде, не обладающей прочностью, хотя приведенные в этой работе экспериментальные данные напрямую указывают на наличие остаточной прочности у разрушенной керамики.

6.3. Поведение керамической брони при ударном воздействии пуль

В связи с широким применение высокотвердых хрупких материалов (керамики, стекла, ситаллы и др.) для защиты от ударнопроникающих воздействий различных средств поражения разработано довольно много динамических моделей разрушения хрупких материалов. Практически все современные модели используют концепцию, согласно которой разрушение представляет собой процесс зарождения и развития в материале повреждений (дефектов, пор, трещин и т.п.) [6.17]. Этот процесс описывается различными кинетическими уравнениями, построенными на основании тех или иных механизмов разрушения. Механические характеристики деформируемого материала полагаются зависимыми от меры поврежденности материала, связанной с историей изменения напряженно-деформированного состояния материальных частиц, составляющих деформированное тело. В [6.1, 6.17] в качестве меры поврежденности керамического материала используется пористость разрушенного материала.

В иностранной научной литературе для описания динамического деформирования хрупких материалов широко используется модель Джонсона–Холмквиста (Johnson–Holmquist) [6.18]. Эта модель интегрирована в распространенный программный комплекс

Autodyn. В этой модели предел прочности хрупкого материала σ в процессе его разрушения меняется от предела прочности исходного неповрежденного материала σ_0 до предела прочности полностью разрушенного (измельченного) материала $\sigma_р$. Соответствующее уравнение имеет вид

$$\sigma = \sigma_0 - D(\sigma_0 - \sigma_р),$$

где D – поврежденность ($0 \le D \le 1$).

Поврежденность определяется как относительная накопленная пластическая деформация $D = \sum \Delta\varepsilon_{пл} / \varepsilon^{р}_{пл}$, где $\Delta\varepsilon_{пл}$– элементарная пластическая деформация (например, за один шаг интегрирования), $\varepsilon^{р}_{пл}$ – условная предельная пластическая деформация при постоянном давлении p, при которой происходит разрушение хрупкого материала. При вычислении $\varepsilon^{р}_{пл}$ учитывается то что, во-первых, действие сжимающих напряжений приводит к некоторому упрочнению хрупких материалов, и, во-вторых, разрушение хрупких материалов может происходить под действием не только растягивающих, но и сжимающих напряжений:

$$\varepsilon^{р}_{пл} = D_1 (P + T_р)^{D_2},$$

где $P = p/Y$ – безразмерное давление; Y – гюгониевский предел упругости (предел упругости на ударной адиабате материала), $T_р = T^*_р/Y$ – безразмерное максимальное напряжение всестороннего растяжения, которое может выдержать материала без разрушения; D_1, D_2 – постоянные.

Пределы прочности неповрежденного и полностью разрушенного материалов зависят от текущих давления и скорости деформации $\dot{\varepsilon}$

$$\sigma_0 = A\left(P + T_р\right)^N \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right),$$

$$\sigma_р = BP^M \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right),$$

где A, N, C, B, M– постоянные, $\dot{\varepsilon}_0 = 1{,}0\ с^{-1}$.

Предел прочности разрушенной керамики ограничен сверху величиной $\sigma_{p\max} = gY$, где g – постоянная.

Гидростатическое давление определяется из уравнения

$$p = K_1\left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1\right) + K_2\left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1\right)^2 + K_3\left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1\right)^3 + \Delta p,$$

в котором K_1, K_2, K_3 – постоянные. После того как материал начинает разрушаться ($D > 0$), давление в материале увеличивается на Δp вследствие превращения высвобождающейся упругой энергии в потенциальную энергию сжатия. При $D = 1$ вся упругая энергия из-за потери материалом сдвиговой прочности превращается в потенциальную энергию всестороннего сжатия.

Численные значения постоянных модели Джонсона–Холмквиста для корундовой, карбидокремниевой керамик и натрийсиликатного стекла [6.19] приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Численные значения постоянных модели Джонсона–Холмквиста

Постоянная	Тип керамики		
	Al_2O_3 $\rho_0 = 3{,}91$ г/см^3	SiC $\rho_0 = 3{,}16$ г/см^3	Стекло, $\rho_0 = 2{,}53$ г/см^3
Модуль Юнга, ГПа	379	423	–
Модуль сдвига, ГПа	153	183	30,4
Y, ГПа	3,76	5,9	2,92
T_p^*, ГПа	0,16	0,37	0,15
A	0,98	0,96	0,93
B	0,35	0,35	0,088
C	0	0	0,003
M	1	1	0,35
N	0,39	0,65	0,77
D_1	0,007	0,0048	0,053
D_2	1,24	0,48	0,85
g	1,4	0,48	0,5
$\varepsilon^p_{пл}$ ($p = 0$), %	0,1	0,1	–
K_1, ГПа	–	–	45,4
K_2, ГПа	–	–	–138,0
K_3, ГПа	–	–	290,0

Для проявления прочности разрушенной керамики необходимо наличие сжимающих напряжений, величина которых зависит от деформационных и прочностных свойств подложки. Поэтому эффективная остаточная прочность разрушенной керамики должна зависеть от жесткости подложки. В [6.20] эффективный предел прочности разрушенной керамики $\sigma_{кр}$ описывается эмпирическим соотношением

$$\sigma_{кр} = 0{,}2\sigma_{к0}\left\{1 - \exp\left[\frac{-\lambda\sigma_{б}}{0{,}2\sigma_{к0}}\left(\frac{\delta_{п}}{h}\right)^{2}\right]\right\},$$

в котором $\sigma_{к0}$ и $\sigma_{б}$ – пределы прочности неповрежденной керамики и материала подложки соответственно; $\delta_{п}$ – толщина подложки; $\lambda \approx 1$ – подгоночный коэффициент; h – текущая толщина керамического слоя между проникающей пулей и границей раздела с подложкой. Для жесткой подложки $\sigma_{кр} = 0{,}2\sigma_{к0}$. Известны и другие зависимости для предела прочности разрушенной керамики [6.21], но они не имеют ни экспериментального, ни теоретического обоснования.

Микромеханизмы деформирования и разрушения керамики имеют ряд существенных особенностей. В отличие от металлов в оксидах, карбидах, нитридах и других соединениях, являющихся основой керамических материалов, высока энергия образования носителей пластической деформации – дислокаций. По этой причине подобные материалы под действием сдвиговых напряжений растрескиваются практически без пластической деформации. Реологически керамики относятся к группе упруго-хрупких материалов и их большие сдвиговые деформации сопровождаются увеличением объема в результате растрескивания материала и разворота образовавшихся фрагментов. Прочность хрупких материалов на сжатие существенно (в 5...10 раз) превосходит прочность на растяжение. Это обусловлено тем, что сжимающие усилия, в отличие от растягивающих, могут передаваться через существующие трещины, не приводя к их дальнейшему распространению. При одноосном сжатии растрескивание (повреждение) керамических образцов начинается при напряжениях порядка 1/3...2/3 предела упругости [6.5]. Образуются отдельные внутренние микротрещины, которые на начальном этапе деформирования не объединены и не вызывают

разрушения тела в целом (рис. 6.1*а*). Растрескивание сопровождается небольшим (менее 1%) увеличением объема. При дальнейшем увеличении сдвиговых напряжений происходит рост и слияние трещин, материал разрушается (рис. 6.1*б*). С ростом давления пороговые напряжения разрушения увеличиваются, поэтому становится возможной пластическая деформация керамики без разрушения. В области разрушенных состояний сопротивление сдвигу возрастает пропорционально действующему давлению.

Из анализа результатов многочисленных экспериментов следует, что чем больше твердость, модуль упругости и прочность керамики, тем более эффективно происходит разрушение пули. Ж.Ж. Стиглиц предложил баллистические защитные качества керамических материалов характеризовать параметром

$$G = EH_{\text{К}}/\rho,$$

где E – модуль упругости, $H_{\text{К}}$ – твердость по Кнупу, ρ – плотность керамики [6.22, 6.23]. Чем больше параметр G, тем выше защитные свойства керамики.

В работе [6.23] были вычислены параметры G для следующих керамик: для керамики Al_2O_3 плотностью ρ = 3800...3900 кг/м^3, G = 1,8...1,9 ГПа^{2}м^3/кг; для реакционноспеченной керамики на основе SiC плотностью ρ = 3120 кг/м^3, G = 2,8 ГПа^{2}м^3/кг; для горячепрессованной керамики на основе B_4C плотностью ρ = 2500 кг/м^3, G = 5,4 ГПа^{2}м^3/кг; и было показано, что баллистическая стойкость указанных керамик соответствовала значению параметра G.

Для противопульной защиты следует использовать керамические материалы с E > 280 ГПа, $H_{\text{К}}$ > 20 ГПа и $\rho \le 3000$ кг/м^3.

В.С. Нешпор, А.Л. Майстренко, Г.П. Зайцев и др. предложили ввести в параметр, характеризующий пулестойкость керамики, критический коэффициент интенсивности напряжений K_{1c} (коэффициент трещиностойкости). Предлагаемый ими параметр Ф имеет вид

$$\Phi = 0{,}36\,\text{HV}cE/K_{1c}^2,$$

где HV – твердость по Виккерсу; c – продольная скорость звука. Этот параметр также позволяет упорядочить керамики по их защищающей способности.

Роль ударной вязкости (вязкости разрушения), характеризуемой, например, коэффициентом трещиностойкости K_{1c}, состоит в том, что увеличение K_{1c} способствует локализации разрушения керамического слоя в области воздействия пули, а, следовательно, увеличивает возможность защитной структуры выдерживать попадание нескольких пуль, что важно практически. При увеличении K_{1c} увеличиваются также размеры фрагментов в области разрушения, что способствует увеличению остаточной прочности разрушенной керамики и более эффективному торможению пули. С другой стороны, если в качестве подложки используется текстильный материал из высокомодульных и высокопрочных органических нитей, могут возникнуть трудности по удержанию крупных керамических фрагментов из-за включения механизма режущего действия острых ребер фрагментов.

Следуя [6.24], получим оценочную зависимость характерного размера образующихся при разрушении фрагментов от прочностных свойств керамики. Обозначим через γ энергию образования единицы поверхности твердого тела. Количество кубических фрагментов n с характерным размером a, образовавшихся при разрушении объема V, будет равно $n = V/a^3$. Суммарная площадь вновь образованных поверхностей $S = 6na^2$. Для суммарной энергии W_p, затраченной на разрушение тела на n кубических фрагментов, имеем следующее выражение

$$W_p = \frac{6\gamma V}{a}.$$

Известно, что энергия образования единицы поверхности γ связана с трещиностойкостью K_{1c}. Для плоского напряженно-деформированного состояния эта связь имеет вид

$$\gamma = \frac{\left(1-\mu^2\right)K_{1c}^2}{2E},$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга. Будем считать, что основную роль в разрушении материала играет упругая энергия W_y, накопленная в объеме при его деформировании до исчерпания упругих свойств

$$W_y = \psi \frac{\sigma_к^2}{2E} V ,$$

где $\psi \approx 1$ – коэффициент, зависящий от вида напряженно-деформированного состояния; $\sigma_к$ – предел упругости керамики. Для разрушения нагруженного объема требуется выполнение неравенства $W_y \geq W_p$. На пределе разрушения $W_y = W_p$, откуда следует соотношение для характерного размера фрагмента

$$a = \frac{6\left(1-\mu^2\right) K_{1c}^2}{\psi \sigma_к^2} .$$

Как следует из полученной зависимости, характерный размер образующихся фрагментов оказывается пропорциональным квадрату трещиностойкости и обратно пропорционален квадрату предела упругости керамики. Поэтому изменение коэффициента трещиностойкости керамики должно заметным образом сказываться на ее эффективности.

В соответствии с законом сохранения энергии баланс энергий и работ, имеющих место при пробитии однослойных преград, можно представить в следующем виде

$$W_0 = A_1 + A_2 + A_3 + W_1 + W_2 ,$$

где W_0 – начальная кинетическая энергия ударника; A_1 – работа деформирования и разрушения ударника; A_2 – работа деформирования и разрушения преграды; A_3 – работа торможения пули при ее проникании в преграду; $W_1 + W_2$ – кинетическая энергия остатка пули и фрагментов преграды. Экспериментальные исследования пробития тонких хрупких высокотвердых преград, выполненные в [6.4], показали следующее распределение начальной кинетической энергии ударника: $A_1 = (0{,}45...0{,}5)\ W_0$; $A_2 = (0{,}02...0{,}03)\ W_0$; $W_1 + W_2 = (0{,}4...0{,}45)\ W_0$. Интересно отметить, что в общем энергетическом балансе доля работы деформирования и разрушения хрупких тонких преград A_2 невелика. При пробитии преград из пластичных материалов доля работы A_2 существенно больше. Что касается работы A_3, то для однослойной керамической преграды без подложки она близка к 0.

Таким образом, роль керамического слоя многослойной преграды сводится к разрушению головной части пули, увеличению

площади воздействия на последующие слои преграды и поглощению части кинетической энергии остатков пули в процессе ее торможения в уже разрушенной керамике. Для удержания разрушенной керамики в сжатом состоянии и предотвращения разлета осколков необходима достаточно прочная и энергоемкая подложка, останавливающая движение остатков пули и разрушенной керамики в процессе своего деформирования без разрушения при допустимой для защищаемого объекта тыльной выпучине.

Важным параметром защитного действия керамического слоя является время существования керамики в жестком состоянии $t_р$. В течение этого времени поврежденность керамики возрастает настолько, что становиться возможным проникание в нее ударника (рис. 6.3). Общепринятыми являются представления о волновом характере разрушения керамики в отраженных от границы раздела с подложкой и от свободной поверхности волнах разрежения, подобно тому, как это происходит при отколе при выходе ударной волны на свободную тыльную или боковую поверхности тела [6.8, 6.22]. Откольное разрушение в твердом теле происходит в результате взаимодействия достаточно сильных разнонаправленных волн разрежения. Характерным временем существования тела в неразрушенном состоянии $\tau_р$ является время двойного пробега звуковой волны в направлении распространения нагрузки. Для керамического слоя это время равно $\tau_р = 2h_к/c_к$ ($c_к \approx 10$ км/с – скорость звука в керамике). Поскольку в процессе распространения по керамическому слою ударные волны быстро затухают, предполагается, что для достижения достаточных для разрушения уровня растягивающих напряжений и времени их действия (динамическое разрушение имеет релаксационный характер) требуется несколько волновых пробегов по слою керамики и $t_р = nh_к/c_к$, где n – необходимое для разрушения число волновых пробегов. Понятно, что n является удобным подгоночным параметром, поскольку всегда можно сослаться на сложность и малую изученность процесса. Так в работе [6.22] рекомендуется использовать значение $n = 6$. В работе [6.21] для керамической преграды из SiC толщиной 9,91 мм принимается $t_р = 15$ мкс, что дает $n \approx 15$. В [6.7] $t_р$ определялось экспериментально путем последовательного теневого рентгенографирования процесса взаимодействия стандартной бронебойной пули НАТО с твердым сердечником ка-

6.6. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / Под ред. Н.А. Златина и Г.И. Мишина. – М.: Наука, 1974. – 344 с.
6.7. Reijer P.C. den, Usselstein R.R. A novel flash X–ray technique to determine projectile ceramic armour interaction / Proceedings of the Twelfth International Symposium on Ballistics – San Antonio, USA. – 1990.
6.8. Никифоровский В.С., Шемякин Е.И. Динамическое разрушение твердых тел. – Новосибирск: Наука, 1979. – 272 с.
6.9. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М: Наука, 1974. – 640 с.
6.10. Эванс А.Г., Лэнгдон Т.Г. Конструкционная керамика. – М.: Металлургия, 1980. – 256 с.
6.11. Скляров Н.М., Машинская Г.П., Александрова Л.Б. и др. Факторы стойкости броневых комбинированных преград // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. – 1996. – Вып.3 (115) - 4 (116).
6.12. Гриневич А.В., Ярош В.В. Анализ разработки керамических материалов для лицевого слоя комбинированной защиты // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. – 1999. – Вып. 1 – 2.
6.13. Гриневич А.В., Ярош В.В. Особенности разрушения керамики при ударном воздействии // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. – 1999. – Вып. 1 – 2.
6.14. Гриневич А.В., Ярош В.В. Дробящий эффект керамического слоя комбинированной брони // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. – 1999. – Вып. 1 – 2.
6.15. Елисеев В.С., Кравченко А.Д., Ярош В.В. Исследование баллистической эффективности высокотвердых материалов// Вопросы оборонной техники. Сер. 15. – 2001. – Вып. 3 – 4 .
6.16. Galvez F., Cendon D., Sanchez– Galvez V. Experimental and numerical comparison of failure of ceramic tiles impacted by FSP's // Proceedings of the Twenty First International Symposium on Ballistics – Adelaide, Australia. – 2004.
6.17. Высокоскоростное взаимодействие тел / В.М. Фомин, А.И. Гулидов, Г.А. Сапожников и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.

6.18. Johnson G.R., Holmquist T.J. An Improved Computational Constitutive Model for Brittle Materials // High Pressure Science and Technology. – NY: AIP Press, 1994
6.19. Holmquist T.J., Johnson G.R., Grady D.E. High Strain Rate Properties and Constitutive Modeling of Glass // Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Ballistics. – Jerusalem, Israel, 1995.
6.20. Ravid M., Bodner S.R., Chochron I.S. Penetration analysis of ceramic armor with composite material backing // Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Ballistics. – Interlaken, Switzerland, 2001.
6.21. Walker J.D., Anderson Ch.E. An analytical model for ceramic–faced light armors // Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Ballistics. – Midrand, South Africa. – 1998.
6.22. Гаршин А.П., Гропянов В.М., Зайцев Г.П., Семенов С.С. Керамика для машиностроения. – М.: Научтехлитиздат. – 2003.
6.23. Кременчугский М.В., Савкин Г.Г., Малинов В.И. и др. Разработка противопульной керамической брони / Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения. В 2-х томах. Т.2 – Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006..
6.24. Разрушение разномасштабных объектов при взрыве / Под общ. ред. А.Г. Иванова. – Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2001. – 482 с.
6.25. Концептуальные основы создания средств индивидуальной защиты. Часть I. Бронежилеты. Под общ. ред. В.Г. Михеева. М.: Межакадемическое изд. «Вооружение. Политика. Конверсия», 2003. – 340 с.

Глава 7. АНАЛИЗ ПРОТИВОПУЛЬНОЙ СТОЙКОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПРЕГРАД С ВНЕШНИМ КЕРАМИЧЕСКИМ СЛОЕМ

7.1. Комбинированная многослойная броня

Защищающая способность преграды по отношению к действию ударно–проникающих средств поражения, например, пуль стрелкового оружия, обычно характеризуют ее толщиной или поверхностной плотностью, при которых обеспечивается «кондиционный» характер поражения преграды. Кондиционному поражению соответствует не только непробитие преграды, но и отсутствие в ней сквозных трещин. Наиболее эффективными считаются преграды, которые при заданном уровне воздействия средств поражения обеспечивают кондиционное поражение при минимальных массовых и габаритных характеристиках.

Основной проблемой при разработке защитных структур СИБ является обеспечение необходимого уровня их противопульной стойкости при минимальной массе и допустимом тыльном прогибе. Именно требование минимальности массы защиты приводит к использованию в СИБ в качестве брони несколько необычных материалов. Так для защиты от низкоэнергетических средств поражения – револьверных и пистолетных пуль широко используется текстильная броня из высокомодульных и высокопрочных полиарамидных или полиэтиленовых нитей (1 и 2 классы защитных структур по ГОСТ Р 50744–95 [7.1]). Эффективная защита от высокоэнергетических средств поражения с высокой проникающей способностью – бронебойных винтовочных пуль с термоупрочненными сердечниками (ТУС) (6-ой класс защитных структур по ГОСТ Р 50744–95) немыслима без использования в качестве элемента защитной структуры керамики – высокотвердого, но очень хрупкого материала, что казалось бы полностью исключает его применение для защиты от ударно–проникающего действия.

В настоящее время ведутся исследования по созданию сверхпрочных металлических, керамических и композитных броневых материалов с применением новейших нанотехнологий. В ближайшее десятилетие можно ожидать появления принципиально новых материалов для баллистической защиты. Однако, несмотря на это, комбинированные многослойные преграды с внешним керамическим слоем и тогда сохранят свое значение для защиты от бронебойных пуль, обладающих максимальной проникающей способностью, в ряду других боеприпасов стрелкового оружия.

Настоящий раздел посвящен расчетному анализу противопульной стойкости многослойных защитных структур СИБ с внешним керамическим слоем. В общем случае анализируемые защитные структуры состоят из керамического, текстильного или органопластикового и металлического слоев, соединенных между собой. Обычно слои, следующие за керамическим слоем, называют подложкой. Защищающие способности керамической, текстильной, органо-пластиковой и металлической брони были рассмотрены выше.

Защитное действие внешнего керамического слоя (см. главу 6) сводится к разрушению головной части пули, увеличению площади воздействия на последующие слои преграды и поглощению части кинетической энергии остатков пули в процессе ее торможения в уже разрушенной керамике. Поскольку ударно–проникающее воздействие пули сопровождается (через некоторое время задержки) образованием разрушенного керамического конуса, то для его удержания в сжатом состоянии и предотвращения разлета образующихся фрагментов необходима достаточно прочная и энергоемкая подложка, поглощающая остаточную кинетическую энергию пули и керамического конуса в процессе своего деформирования.

Поглощение остаточной кинетической энергии воздействия осуществляется путем ее преобразования в работу деформирования подложки, в результате чего образуется запреградная (тыльная) выпучина, характеризуемая величиной максимального прогиба w. От величины прогиба w зависит степень тяжести травмы защищаемого объекта. В зависимости от вида СИБ и их конструкции допустимые величины максимальных прогибов $w_{доп}$ изменяются в достаточно широких пределах. В защитных касках величина $w_{доп}$ не должна превосходить, по-видимому, 10 мм, а в бронежилетах с ан-

титравматической прокладкой $w_{доп}$ может достигать 20 мм. Приведенные величины допустимых прогибов следует рассматривать как ориентировочные.

Защитное действие текстильного или органо-пластикового слоя рассмотрено в главе 3. Для последующего анализа необходимо выражение для силы сопротивления органо-пластикового слоя движению керамического конуса. Пусть радиус большего основания движущегося керамического конуса равен R, тогда суммарное число нитей $n_н$ во всех слоях ткани, проходящих через круговую область радиуса R, будет равно

$$n_н = \frac{2Rm_{оп}(1-\xi)}{\rho_0 s},$$

где $m_{оп}$ – поверхностная плотность текстильного или органопластикового слоя, ξ – массовая доля связующего. Суммарная сила сопротивления органо-пластикового слоя движению керамического конуса с учетом (3.4) будет равна

$$F = 3{,}2\, v^{\frac{5}{3}} c^{\frac{1}{3}} m_{оп} R(1-\xi), \qquad (7.1)$$

где v – скорость движения керамического конуса. Не представляет труда учесть уменьшение этой силы сопротивления вследствие обрыва нитей при достижении ими предельного удлинения.

В трехслойной защитной структуре основное назначение металлического слоя состоит в уменьшении тыльного прогиба. Как правило, толщина металлического слоя не превышает 1,5...2 мм. В качестве материала металлического слоя возможно использование высокопрочных сталей, броневых алюминиевых и титановых сплавов. Требования к физико-механическим свойствам материалов металлических подложек отличаются от требований к материалам противопульной брони только в одном – они могут обладать несколько большей пластичностью и меньшей твердостью.

Наилучшим сочетанием свойств обладают подложки из титановых сплавов. Имея небольшую плотность (4400...4500 кг/м^3), что принципиально важно для достижения минимальной поверхностной плотности защитной структуры, титановые сплавы по удель-

ной прочности (отношение прочности к плотности) значительно превосходят броневые стали.

Работу образования выпучины иногда называют энергоемкостью подложки. Оценим энергоемкость металлического слоя подложки толщиной $\delta_м$, предполагая, что выпучина образуется в результате пластического деформирования и имеет форму сферического сегмента высотой w и радиусом основания R. Работа образования сферического сегмента состоит из работы напряжений растяжения материала слоя $A_р$ и работы его изгиба $A_{изг}$ [7.2].

$$A_p = \int_V \left(\int_0^{\varepsilon_{i\max}} \sigma_i d\varepsilon_i \right) dV \approx \sigma_т \varepsilon_{icp} V ,$$

где σ_i, ε_i – интенсивности напряжений и деформаций; $\sigma_т$ – динамический предел текучести материала, ε_{icp}– среднее значение интенсивности деформаций; V – объем деформированной части металлического слоя, $V = \pi R^2 \delta_м$.

Средняя деформация удлинения ε_r материала подложки в выпучине вдоль радиального направления равна

$$\varepsilon_r = \frac{f - 2R}{2R},$$

где f – длина дуги сегмента. Для f известна приближенная формула

$$f = \sqrt{4R^2 + \frac{16w^2}{3}}$$

С использованием этой формулы для ε_r можно получить следующее выражение

$$\varepsilon_{rr} = \sqrt{1 + \frac{4}{3}\frac{w^2}{R^2}} - 1 .$$

Для малых прогибов w, разлагая подкоренное выражение в ряд и оставляя только первый член разложения, получим

$$\varepsilon_r \approx \frac{4}{6}\frac{w^2}{R^2} .$$

Система дифференциальных уравнений движения пули, срабатывающейся на жесткой несмещающейся преграде, имеет вид

$$\frac{dv_{\text{п}}}{dt} = -\frac{\sigma_{\text{п}} S(l)}{M_{\text{п}}(l)}, \quad \frac{dl}{dt} = -v_{\text{п}}, \tag{7.3}$$

где $v_{\text{п}}$ – скорость пули; l – длина несработавшейся части пули, измеряемая от донного среза; $\sigma_{\text{п}}$ – предел прочности материала пули (предел текучести для пластичной пули и предел прочности для хрупкой пули); $S(l)$ – площадь поперечного сечения пули; $M_{\text{п}}(l)$ – масса несработавшейся части пули. Начальные условия: $t = 0$; $v_{\text{п}}=v_0$; $l = l_0$ (l_0 – начальная длина пули). Функции $S(l)$ и $M(l)$ имеют вид: для цилиндрической пули

$$S(l) = S_0 = \pi r^2, \quad M_{\text{п}}(l) = \rho_{\text{п}} \pi r^2 l;$$

для цилиндроконической пули

$$S(l) = \begin{cases} \pi r^2 & \text{если } l \le l_0 - l_{\text{к}}, \\ \pi r^2 \left(\dfrac{l_0 - l}{l_{\text{к}}} \right), & \text{если } l > l_0 - l_{\text{к}}, \end{cases}$$

$$M_{\text{п}}(l) = \begin{cases} \rho_{\text{п}} \pi r^2 l & \text{если } l \le l_0 - l_{\text{к}}, \\ \rho_{\text{п}} \pi r^2 \left[(l_0 - l_{\text{к}}) + \dfrac{l - (l_0 - l_{\text{к}})}{3} \left(1 + \dfrac{l_0 - l}{l_{\text{к}}} + \left(\dfrac{l_0 - l}{l_{\text{к}}} \right)^2 \right) \right] \\ \text{если } l > l_0 - l_{\text{к}}, \end{cases}$$

где r – радиус пули; $\rho_{\text{п}}$ – плотность материала пули; $l_{\text{к}}$ – длина конической головной части пули.

Численное интегрирование системы уравнений (7.3) производится до момента разрушения керамического слоя $t_{\text{р}}$. В результате расчета определяются зависимости $v_{\text{п}}(t)$ и $l(t)$. Выходными данными являются: скорость пули в конце первой фазы $v_{\text{п1}} = v_{\text{п}}(t_{\text{р}})$; остаточная длина пули $l_{\text{п1}} = l(t_{\text{р}})$ и остаточная масса пули $M_{\text{п1}}$.

Фаза 2. Проникание в разрушенную керамику, $t > t_р$.

Вторая фаза начинается в момент завершения образования конуса разрушенной керамики и сопровождается проникание оставшейся части пули в разрушенную керамику, ускорением керамического конуса и деформированием подложки (рис. 6.1*в*). В течение второй фазы нагрузка с помощью керамического конуса передается на подложку, которая предотвращает разлет керамики, сохраняя ее в сжатом состоянии. Поскольку в сжатом состоянии разрушенная керамика обладает некоторой прочностью, то она оказывает не только инерционное, но и прочностное сопротивление проникание пули. В течение второй фазы формируется тыльная выпучина, высота которой определяет степень тяжести травмирования защищаемого объекта. Вторая фаза заканчивается после того, как ударник остановится или полностью проникнет через разрушенную керамику и достигнет подложки.

Перед тем как записать уравнения, управляющие движением пули и керамического конуса, определим взаимосвязь между скоростью пули $v_п$ и скоростью ее проникания u (скоростью границы раздела пуля–керамика) в движущийся со скоростью $v_к$ разрушенный керамический конус. Для этого воспользуемся моделью Алексеевского–Тейта проникания деформируемого ударника в прочную деформируемую среду. Для случая проникания в движущуюся среду соответствующее уравнение имеет вид [7.9]

$$\sigma_п + \frac{1}{2}\rho_п(v_п - u)^2 = H_к + \frac{1}{2}\rho_к(u - v_к)^2, \qquad (7.4)$$

где $H_к$ – так называемая динамическая твердость материала преграды, в данном случае – разрушенной керамики. Для $H_к$ справедлива оценка $H_к \approx 3\sigma_к$, где $\sigma_к$ – динамический предел прочности на сжатие. Разрешив уравнение (7.4) относительно u, получим искомое соотношение

$$u = \frac{\lambda v_п}{\lambda^2 - 1}\left[\left(\lambda - \frac{v_к}{\lambda \cdot v_п}\right) - \sqrt{\left(1 - \frac{v_к}{v_п}\right)^2 + \frac{(\lambda^2 - 1)}{v_п^2} \cdot \frac{2(H_к - \sigma_п)}{\rho_п}}\right], \qquad (7.5)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_c}}.$$

При использовании этого соотношения в численном счете необходимо следить за выполнением условия его физической состоятельности, которое заключается в выполнении неравенств $v_п \geq u$, $u \geq v_к$.

Характер проникания зависит от соотношения между $H_к$ и $\sigma_п$. При $\sigma_п < H_{кр}$ (проникание неупрочненной стальной или свинцовой пули) пуля деформируется в течение всего процесса проникания, который прекращается ($u - v_к = 0$) при уменьшении скорости пули до величины $v_{кр1}$

$$v_{кр1} = v_к + \sqrt{\frac{2(H_к - \sigma_п)}{\rho_п}}. \qquad (7.6)$$

После этого осуществляется совместное торможение пули и керамического конуса силами, возникающими при деформировании подложки.

При проникании прочной пули (например, ТУС бронебойной пули), как правило, выполняется условие $\sigma_п > H_к$. В этом случае разрушение или деформирование пули в процессе проникания возможно, если после торможения пули на первой фазе взаимодействия скорость пули превышает величину $v_{кр2}$ равную

$$v_{кр2} = v_к + \sqrt{\frac{2(\sigma_п - H_к)}{\rho_к}}. \qquad (7.7)$$

Если же скорость пули меньше этой критической величины $v_п \leq v_{кр2}$, то пуля проникает в керамику как твердое тело не срабатываясь и не разрушаясь, и ее скорость равна скорости проникания $v_п = u$.

Уравнение движения не срабатывающейся цилиндрической пули при проникании в разрушенную керамику имеет вид

$$M_{п1}\frac{dv_п}{dt} = -H_к S_0 - \frac{1}{2}\rho_к (u - v_к)^2 S_0.$$

Как видно из этого уравнения, сила торможения пули состоит из прочностной и инерционной составляющих. Понятно, что прочностная составляющая $H_к S_0$ вследствие дальнейшего разрушения керамики и уменьшения сжимающих напряжений в процессе проникания изменяется, но в рассматриваемой модели она принимается постоянной и равной некоторому среднему значению $H_{кр}$.

Уравнение движения срабатывающейся пули имеет точно такой же вид, как и на первой фазе, поскольку ее торможение осуществляется силами прочностного сопротивления деформированию или разрушению самой пули

$$\frac{dv_п}{dt} = -\frac{\sigma_п S(l)}{M_п(l)}. \qquad (7.8)$$

Независимо от характера проникания глубина проникания пули в керамический слой x определяется дифференциальным уравнением

$$\frac{dx}{dt} = u. \qquad (7.9)$$

Длина срабатывающейся пули l изменяется в соответствии с уравнением

$$\frac{dl}{dt} = -(v_п - u). \qquad (7.10)$$

Если пуля не срабатывается, то длина ее остается неизменной и равной $l_{п1}$.

Перед тем, как перейти к уравнениям движения керамического конуса и подложки, остановимся на характере их движения. Предполагается, что керамический конус и слои подложки под ним движутся совместно с одной и той же скоростью $v_к$. Это означает, что материалы подложки в процессе деформирования сохраняют постоянную плотность и не растекаются в стороны. Поэтому дифференциальное уравнение для тыльного прогиба w можно записать в виде

$$\frac{dw}{dt} = v_к. \qquad (7.11)$$

Скорость изменения толщины h еще не пробитого слоя керамики определяется разностью скоростей движения керамического конуса $v_к$ и проникания в него пули u

$$\frac{dh}{dt} = v_к - u\,. \qquad (7.12)$$

Для вывода уравнения движения керамического конуса воспользуемся теоремой об изменении кинетической энергии системы, согласно которой скорость изменения кинетической энергии системы равна сумме мощностей работ всех действующих на систему и в системе сил. Обозначим через $W_п$ суммарную кинетическую энергию керамического конуса и части подложки, находящейся под нижним основанием этого конуса. Для $W_п$ можно записать следующее соотношение

$$W_п = \frac{(M_к + \chi m_п) v_к^2}{2},$$

где $M_к = \frac{\pi \rho_к}{3}\left(R^2 + r^2 + Rr\right)h = Lh$ – масса керамического конуса; $m_п = \pi R^2 (m_{оп} + \rho_м \delta_м)$ – суммарная масса органо-пластикового и металлического слоев подложки; χ – коэффициент приведения массы подложки, учитывающий неравномерность ее скорости. Предполагается, что в процессе торможения пули радиусы верхнего r и нижнего R оснований конуса остаются постоянными, а высота конуса h изменяется в соответствии с (7.12), что учитывается при вычислении производной от $W_п$ по времени.

$$\frac{dW_п}{dt} = (M_к + \chi m_п) v_к \frac{dv_к}{dt} + \frac{L v_к^2}{2}(v_к - u)$$

Используя вышеприведенные соотношения для сил и работ [7.4, 7.5] и исходя из теоремы об изменении кинетической энергии, получим следующее уравнение совместного движения керамического конуса и подложки

$$(M_к+\chi m_п)v_к\frac{dv_к}{dt}=-\frac{Lv_к^2}{2}(v_к-u)+\left(H_к+\frac{\rho_к(u-v_к)^2}{2}\right)\cdot S_0u- \\ -3{,}2v_0^{\frac{5}{3}}c^{\frac{1}{3}}m_{оп}R(1-\xi)v_к-\pi\sigma_т\delta_м v_к\left(\frac{8}{3}w+\delta_м\right). \qquad (7.13)$$

В правой части этого дифференциального уравнения первый член дает убыль кинетической энергии керамического конуса вследствие уменьшения его массы; второй член представляет мощность работы силы взаимодействия пули с керамическим конусом; третий член – это мощность работы силы сопротивления органопластикового слоя подложки, и, наконец, четвертый член – мощность работы пластического деформирования металлического слоя подложки.

Определимся с начальным условием для этого дифференциального уравнения. В соответствии с законом сохранения импульса начальный импульс, приобретаемый конусом и подложкой, равен потере импульса пули в течение первой фазы взаимодействия. Поэтому начальная скорость керамического конуса $v_{к1}$ определяется соотношением

$$v_{к1}=\frac{M_{п0}v_{п0}-M_{п1}v_{п1}}{M_{к0}+\chi m_п},$$

в котором индексом 0 отмечены начальные значения соответствующих переменных величин, а индексом 1 – значения величин, которые они получили в конце первой фазы.

Полная система дифференциальных уравнений, описывающая вторую фазу взаимодействия бронебойной пули с трехслойной преградой, приведена ниже. Она состоит из уравнений (7.8...7.13)

$$\frac{dx}{dt}=u,$$

$$\frac{dv_п}{dt}=\begin{cases}-\dfrac{H_{кр}\cdot S_0}{M_{п1}}-\dfrac{\rho_к S_0}{2M_{п1}}\cdot(u-v_к)^2 & \text{если } v_п\le v_{кр2},\\ -\dfrac{\sigma_п S(l)}{M_п(l)} & \text{если } v_п>v_{кр2},\end{cases}$$

$$\frac{dl}{dt}=\begin{cases}v_{\text{п}}-u & \text{если } v_{\text{п}}\geq u,\\ 0 & \text{если } v_{\text{п}}<u,\end{cases}$$

$$\frac{dw}{dt}=v_{\text{к}},\qquad (7.14)$$

$$\frac{dv_{\text{к}}}{dt}=\frac{1}{M_{\text{к}}+\chi m_{\text{п}}}\left[-\frac{Lv_{\text{к}}}{2}(v_{\text{к}}-u)+\left(H_{\text{кр}}+\frac{\rho_{\text{к}}\cdot(u-v_{\text{к}})^2}{2}\right)\cdot\frac{S_0u}{v_{\text{к}}}-\right.$$

$$\left.-3{,}2v_0^{\frac{5}{3}}c^{\frac{1}{3}}m_{\text{оп}}R(1-\xi)-\pi\sigma_{\text{т}}\delta_{\text{м}}\left(\frac{8}{3}w+\delta_{\text{м}}\right)\right]$$

$$\frac{dh}{dt}=v_{\text{к}}-u$$

Начальные условия для этой системы уравнений: при $t = 0$, $x = 0$, $v_{\text{п}} = v_{\text{п1}}$, $l = l_1$, $w = 0$, $v_{\text{к}} = v_{\text{к1}}$, $h = h_0$. Численное интегрирование системы уравнений осуществляется методом Рунге–Кутты четвертого порядка. Интегрирование производится до момента времени $t_{\text{к}}$, в который либо полностью пробивается керамический слой $h(t_{\text{к}}) = 0$, либо при $h(t_{\text{к}}) \geq 0$ происходит остановка пули $v_{\text{п}}(t_{\text{к}}) = 0$. В результате расчетов определяются все характеристики взаимодействия, наиболее важными из которых являются зависимости: $v_{\text{п}}(t)$, $v_{\text{к}}(t)$, $l(t)$, $w(t)$ и $h(t)$.

Фаза 3. Проникание в подложку, пробитие всей преграды.

В настоящей работе эта фаза не рассматривается, поскольку проникание пули в подложку, как правило, сопровождается пробитием всей преграды. Кондиционным считается поражение преграды, при котором пробивается только керамический слой.

7.3. Примеры использования инженерной методики для анализа защищающей способности двухслойных и трехслойных защитных структур

Для того чтобы продемонстрировать возможности разработанной методики, в настоящем разделе приведены результаты численного анализа противопульной стойкости трехслойных и двухслойных преград. Трехслойная преграда состояла из внешнего керамиче-

ского слоя из карбида бора, промежуточного органо-пластикового слоя и тыльного титанового слоя. Двухслойные преграды состояли либо из керамического и органо-пластикового слоев, либо из керамического и титанового слоев. Анализировалось воздействие на преграды цилиндроконических моделей сердечников бронебойной пули Б-32 и стальной пули ЛПС к винтовке СВД. Модельные сердечники имели одинаковые с реальными массу, длину и диаметр. Характеристики сердечников приведены в табл. 7.1.

Свойства керамического слоя, необходимые для расчетов: плотность $\rho_к$ = 2,4 г/см^3; средняя динамическая твердость поврежденной керамики $H_к$ = 1,1 ГПа, что более чем в 20 раз ниже исходной твердости керамики; число пробегов волн, необходимых для формирования конуса разрушенной керамики n = 15; угол при вершине конуса 130°. Расчеты проводились для двух толщин керамического слоя h_0 = 12 мм и h_0 = 10 мм.

Таблица 7.1

Характеристики сердечников пуль Б–32 и ЛПС к винтовке СВД

Тип пули	Масса, г	Длина, мм	Диаметр, мм	Твердость	Форма головной части	Материал, предел прочности	Дульная скорость, м/с
ЛПС	4,72	23,95	6,12	HRC<25	Притупленная $d_т$=3,5мм	Ст. 10...20 $\sigma_п$=0,4 ГПа	847
Б–32	5,38	28,5	6,14	HRC>65	Острая	У12А $\sigma_п$=1,4 ГПа	830

Органопластиковый слой характеризовался следующими параметрами: поверхностной плотностью $m_{оп}$, которая в разных вариантах защитных структур изменялась в пределах (0...11,6) кг/м^2; скоростью звука в нитях c = 10 км/с и долей связующего ξ = 0,1.

Характеристики титанового слоя, используемые в расчетах: плотность $\rho_м$ = 4,4 г/см^3, $\sigma_т$ = 0,75 ГПа, толщина $\delta_м$ – переменная.

Рассмотрим результаты расчетов для случая воздействия сердечника пули Б-32 на трехслойную преграду с параметрами: h_0 = 12 мм ($m_к$ = 28,8 кг/м^2); $m_{оп}$ = 5 кг/м^2; $\delta_м$ = 1,5 мм ($m_м$ = 6,6 кг/м^2), $m_к$, $m_м$ – поверхностные плотности керамического и металлического слоев. Суммарная поверхностная плотность преграды составляет $m_{пп}$ = 40,4 кг/м^2. Из расчетов следует, что предел кондиционного

поражения (полностью пробивается керамический слой) такой преграды составляет $v_{пкл}$ = 840 м/с, что соответствует дульной скорости пули Б-32 винтовки СВД. Максимальный прогиб преграды при этом равен w = 10 мм. На рис. 7.1 приведены зависимости скорости и длины сердечника от времени в течение первой фазы взаимодействия для $v_{п0}$ = 840 м/с. Потеря кинетической энергии пули на этой фазе составляет 56%, остаточные скорость, масса и длина равны соответственно 724 м/с, 3,25 г и 14 мм.

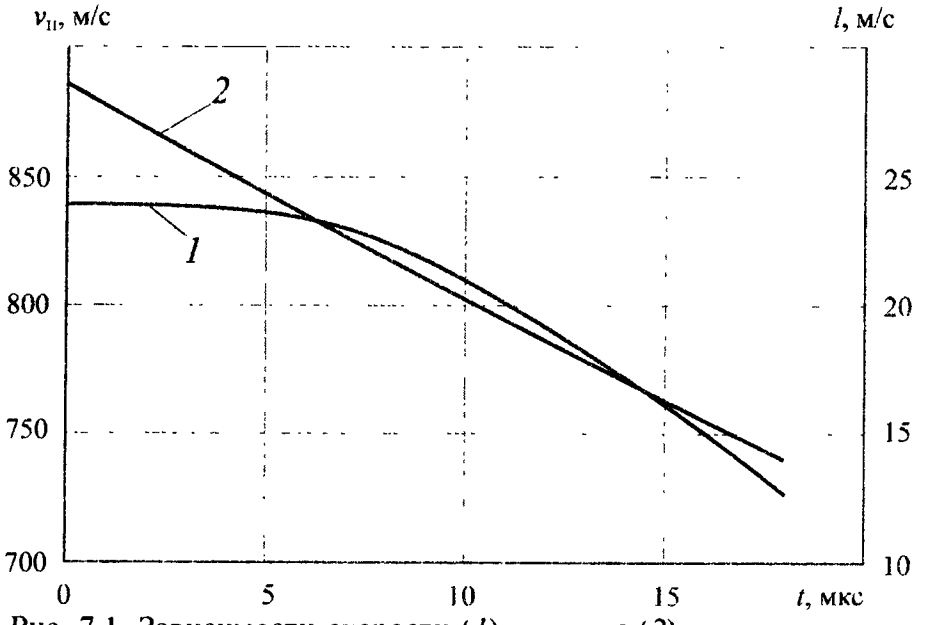


Рис. 7.1. Зависимости скорости (*1*) и длины (*2*) сердечника пули Б–32 от времени в течение первой фазы взаимодействия с керамическим слоем при начальной скорости пули $v_{п0}$ = 840 м/с.

Для второй фазы взаимодействия зависимости скоростей пули и керамического конуса от времени приведены на рис. 7.2*а*, а зависимости тыльного прогиба, длины пули и текущей толщины керамики – на рис. 7.2*б*. Интересно отметить, что в начале второй фазы взаимодействия из-за высокой скорости сердечника происходит его небольшое дополнительное срабатывание ~ 2 мм. Полное торможение пули осуществляется за время $t_т$ = 98 мкс. Среднее усилие $F_{ср}$, возникающее при торможении пули, можно оценить с помощью зависимости

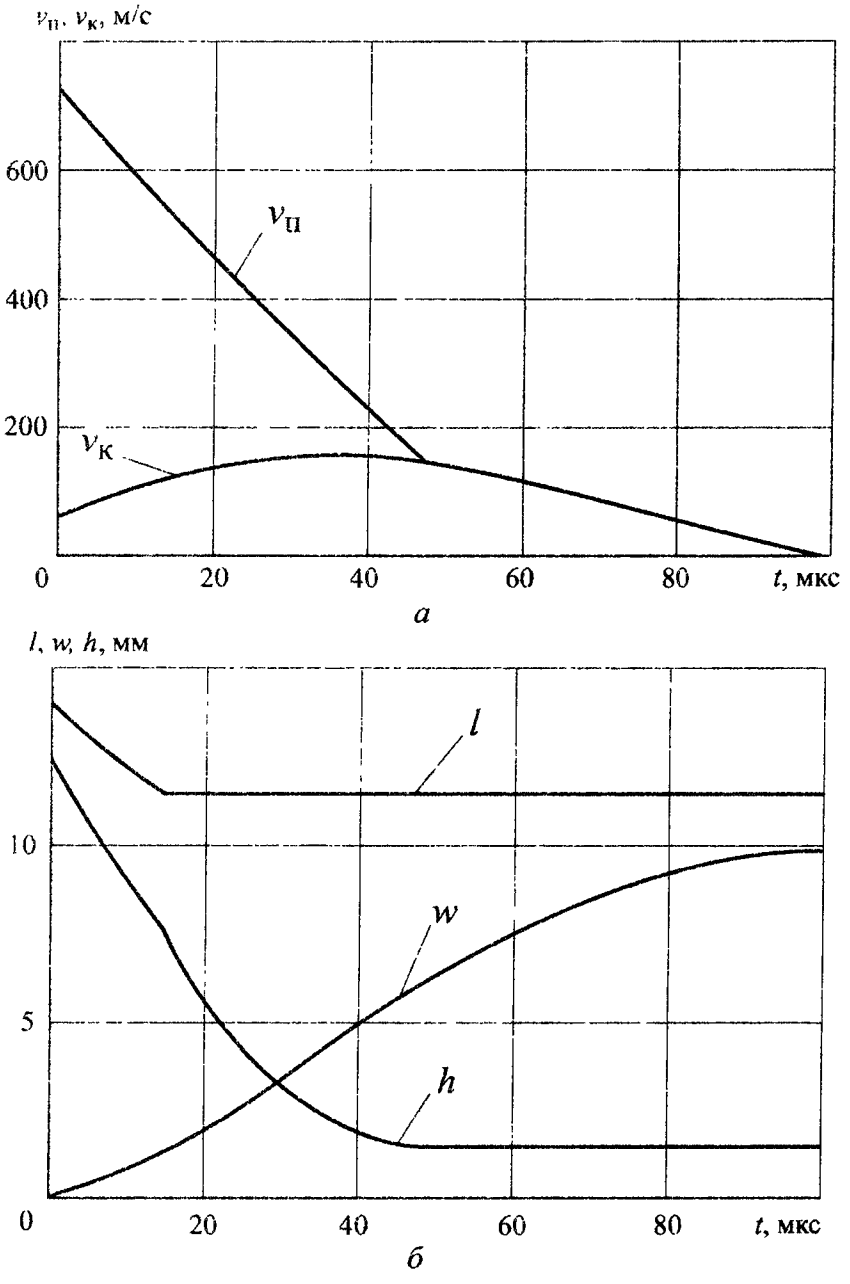


Рис. 7.2. Вторая фаза взаимодействия сердечника пули Б-32 с разрушенной керамикой. Зависимости от времени: *а* – скоростей сердечника и керамического конуса; *б* – тыльного прогиба, длины сердечника и текущей толщины керамики.

$$F_{ср} = \frac{M_{п0} v_{п0}}{t_т + t_р},$$

Для рассматриваемого случая $F_{ср}$ = 39 кН. При массе защищаемого объекта 50 кг это усилие порождает импульсную перегрузку ~ 80g. Для предупреждения травмы от действия такой перегрузки необходима амортизационная прокладка, увеличивающая время передачи ударного импульса защищаемому объекту.

Уменьшение поверхностной плотности преграды до $m_{пц}$ = 34,6 кг/м^2, достигаемое выбором следующих характеристик слоев: h_0 = 10 мм ($m_к$ = 24 кг/м^2); $m_{оп}$ = 4 кг/м^2; $\delta_м$ = 1,5 мм ($m_м$ = 6,6 кг/м^2), приводит к уменьшению $v_{пкп}$ до 650 м/с при тыльном прогибе w = 9,9 мм.

Для сравнения был проанализирован случай воздействия нетермоупрочненного сердечника пули ЛПС на облегченную трехслойную преграду с $m_{пп}$ = 34,6 кг/м^2. Соответствующие зависимости для $v_{п0}$ = 840 м/с приведены на рис. 7.3 и 7.4. Относительно не

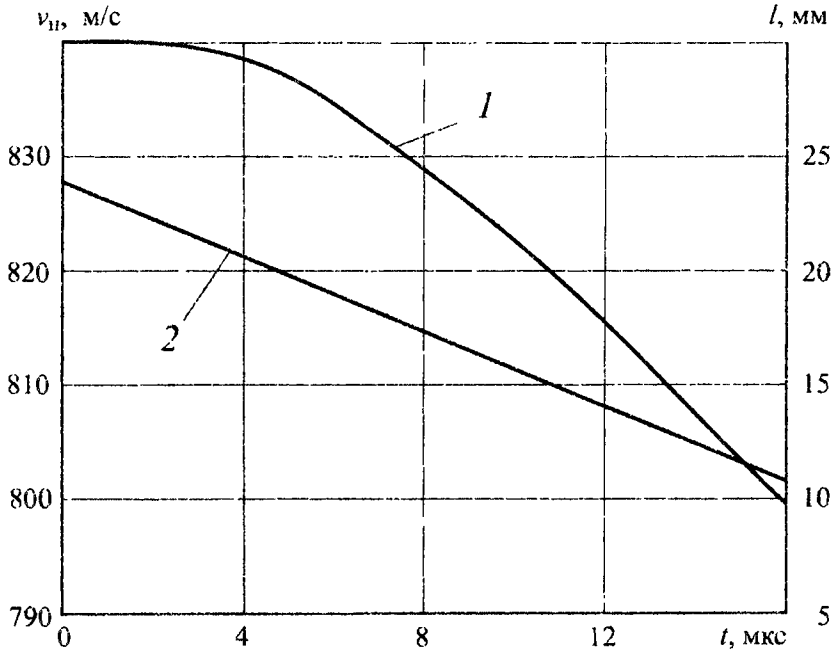
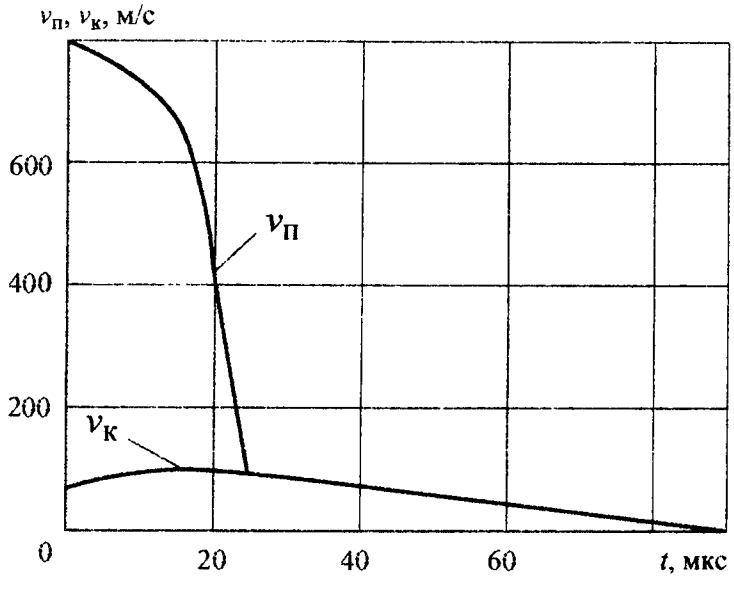
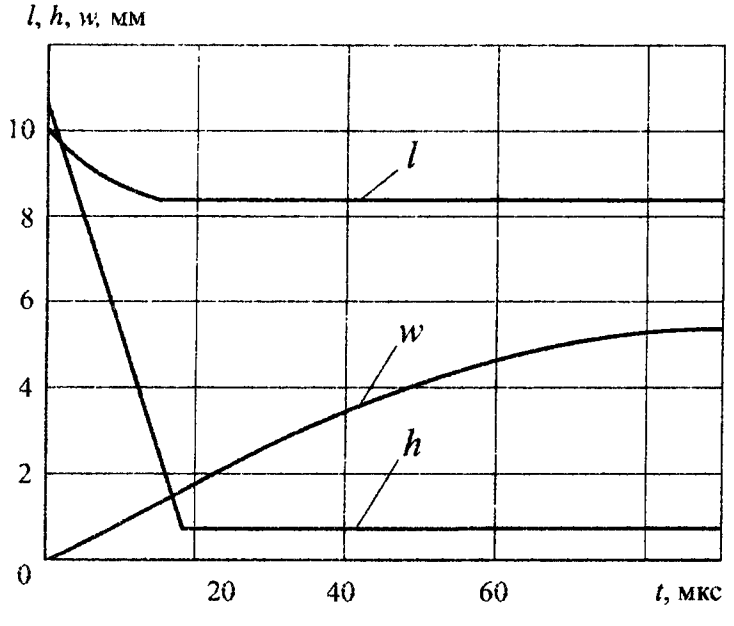


Рис. 7.3. Зависимости скорости (*1*) и длины (*2*) не термоупрочненного сердечника пули ЛПС от времени в течение первой фазы взаимодействия с керамическим слоем при начальной скорости пули $v_{п0}$ = 840 м/с



а



б

Рис. 7.4. Вторая фаза взаимодействия сердечника пули ЛПС с разрушенной керамикой. Зависимости от времени: *а* – скоростей сердечника и керамического конуса; *б* – тыльного прогиба, длины сердечника и текущей толщины непробитого слоя керамики

высокая прочность материала пули приводит к ее более интенсивному срабатыванию на первой фазе, но остаточная скорость v_1 = 760 м/с оказывается при этом выше, чем для сердечника пули Б-32.

На второй фазе взаимодействия происходит дальнейшее интенсивное срабатывание сердечника, что приводит к относительно малой величине тыльного прогиба и небольшому прониканию в керамический слой.

На рис. 7.5 для рассмотренных выше сочетаний средств поражений и преград приведены зависимости тыльных прогибов от скорости сердечников. Сравнение их с экспериментальными данными, приведенными в [7.8], показывает удовлетворительное согласие, что позволяет сделать вывод о работоспособности рассматриваемой методики.

Представляют интерес результаты анализа взаимодействия сердечника пули Б-32 с двухслойной керамико-органо-пластиковой

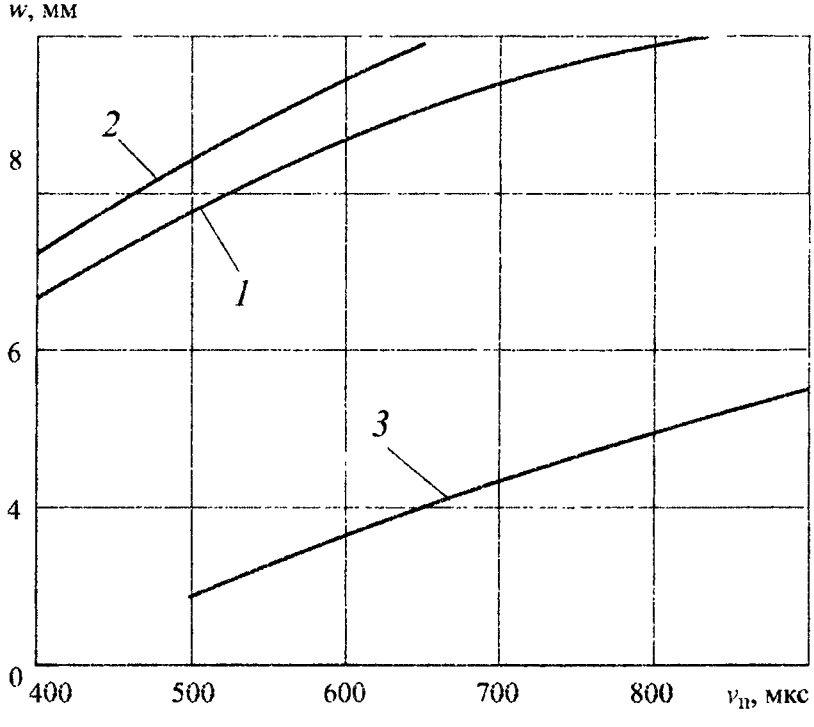
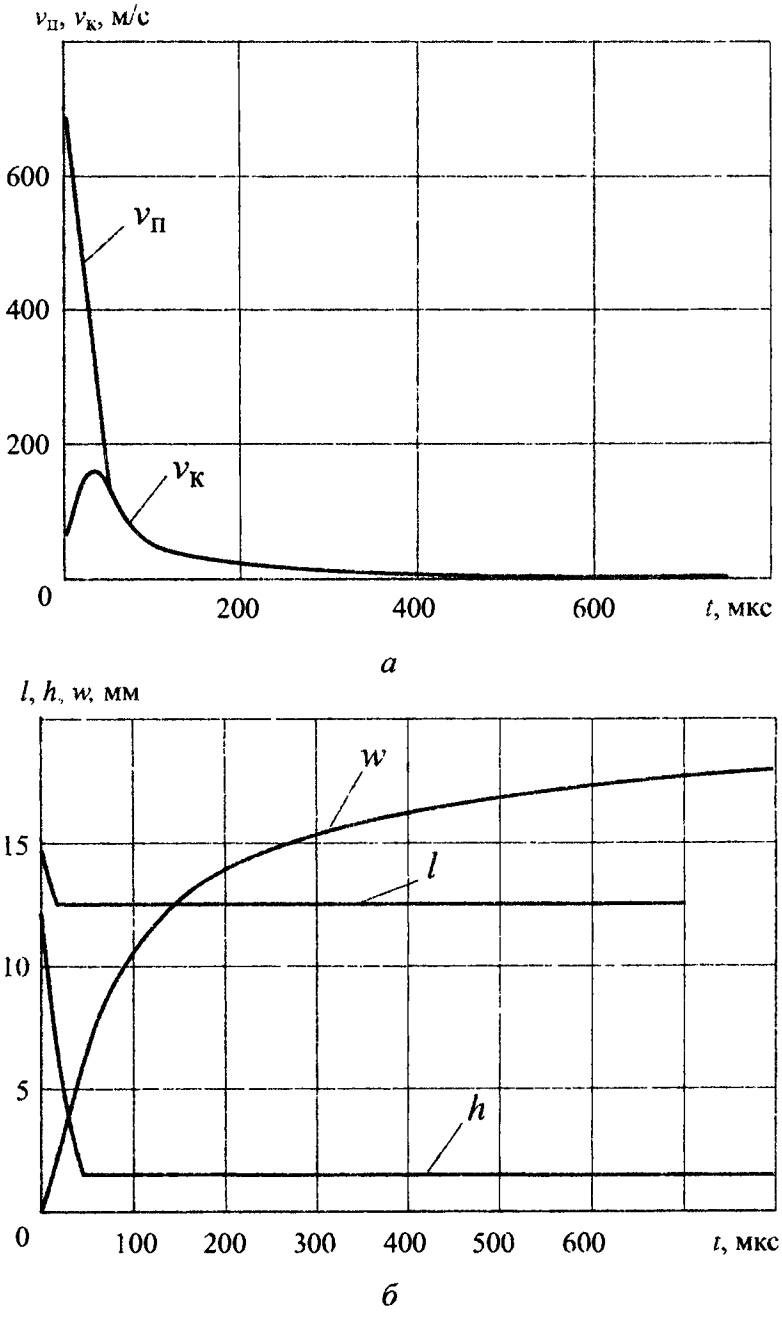


Рис. 7.5. Зависимости максимальных тыльных прогибов трехслойных преград от скорости сердечников для: *1* – сердечник пули Б-32 и преграда с $m_{пп}$ = 40,4 кг; *2* – сердечник пули Б-32 и преграда с $m_{пп}$ = 34,6 кг; *3* – сердечник пули ЛПС и преграда с $m_{пп}$ = 34,6 кг

защитной структурой, поскольку такие структуры используются в бронежилетах. Для обеспечения поверхностной плотности $m_{пп}$ = 40,4 кг/м^2 характеристики слоев преграды были выбраны следующими: h_0 = 12 мм; $m_{оп}$ = 11,6 кг. При проведении анализа предполагалось, что первая фаза взаимодействия такая же, как и для трехслойной преграды. Для второй фазы взаимодействия зависимости скоростей пули и керамического конуса от времени приведены на рис. 7.6*а*, а зависимости тыльного прогиба, длины пули и текущей толщины непробитого слоя керамики – на рис. 7.6*б*. Обращает на себя внимание значительное увеличение времени торможения пули – оно возрастает, примерно, в 10 раз и составляет ~ 800 мкс. Несмотря на увеличение толщины органо-пластикового слоя более чем в 2 раза, отсутствие металлического слоя приводит к существенному увеличению тыльного прогиба до величины w = 18,5 мм. При уменьшении скорости пули от 840 м/с до 600 м/с тыльный прогиб уменьшается незначительно – до 17,5 мм, но заметно возрастает толщина непробитого керамического слоя от 1,34 мм до 3,64 мм. Уменьшение поверхностной плотности преграды до 34,6 кг (h_0 = 10 мм, $m_{оп}$ = 10,6 кг) приводит к увеличению тыльного прогиба до 20 мм и непробитой толщине керамического слоя 0,6 мм. Так как реальная скорость взаимодействия пуль с защитной структурой всегда ниже дульной скорости, то с небольшим запасом облегченная защитная структура приемлема в качестве начального варианта для последующей экспериментальной отработки.

Анализ защитных структур с постоянной поверхностной плотностью $m_{пп}$ = 40,4 кг/м^2 и одинаковой толщиной керамического слоя h_0 = 12 мм, но с разным соотношением толщин органопластикового и металлических слоев по величине тыльного прогиба показал их примерно одинаковую эффективность. Результаты соответствующих расчетов приведены в табл. 7.2.

Как следует из таблицы, увеличение жесткости преграды приводит к уменьшению величины тыльного прогиба, но при этом уменьшается толщина непробитого слоя керамики, что увеличивает риск пробития всей преграды.



а

б

Рис. 7.6. Вторая фаза взаимодействия сердечника пули Б–32 с двухслойной керамико-органо-пластиковой преградой. Зависимости от времени: *а* – скоростей сердечника и керамического конуса; *б* – тыльного прогиба, длины сердечника и текущей толщины непробитого слоя керамики.

Таблица 7.2

Характеристики взаимодействия сердечников пуль Б–32 с многослойной преградой.

$m_{пп}$ = 40,4 кг/м^2; h_0 = 12 мм, $m_к$ = 28,8 кг/м^2; $v_{п0}$ = 800 м/с

$m_{оп}$, кг/м^2	$\delta_м$, мм	$m_м$, кг/м^2	w, мм	$h_{ост}$, мм
11,6	0	0	18	1.54
9,4	0,5	2,2	12	1,32
7,2	1,0	4,4	10,1	1,21
5,0	1,5	6,6	9,9	1.14
0	2,64	11.6	9.3	0,90

Полученные результаты находятся в удовлетворительном согласии с известными экспериментальными данными [7.10, 7.11] и не противоречат существующим представлениям.

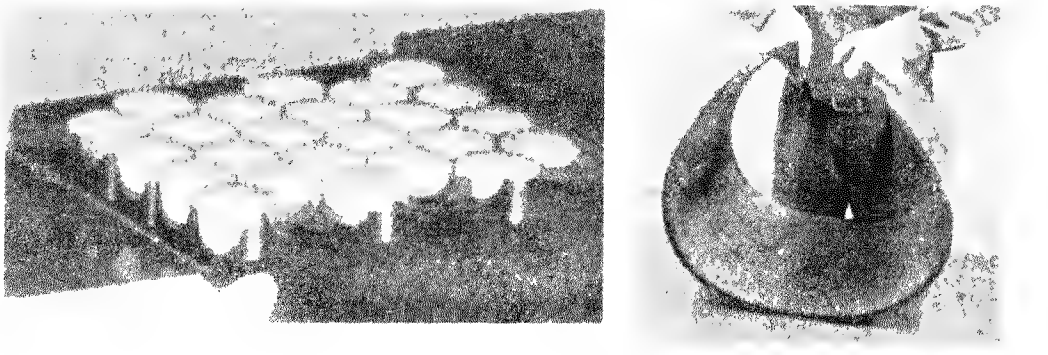
7.4. Методы повышения живучести многослойных защитных структур с внешним керамическим слоем

Существенным недостатком керамических монопанелей является их низкая живучесть – способность сохранять защищающую способность при попадании нескольких пуль. Поэтому керамический слой многослойных защитных структур изготовляют из отдельных керамических элементов с размерами сторон 50...100 мм, толщиной 10...15 мм, которые приклеиваются к органопластиковой или металлической подложке [7.12]. Для предотвращения передачи трещин соседним элементам между ними оставляют небольшой зазор (около 0,5 мм), который заполняется эластомером. С целью удержания фронтальных осколков, образующихся при разрушении пули и керамики, к лицевой поверхности керамического слоя приклеивают несколько слоев баллистической ткани.

Известны также дискретные структуры керамического слоя, состоящего из небольших керамических элементов, заполняющих слой сплошным образом (керамические элементы в виде квадратных и шестиугольных призм) или с зазорами (цилиндрические и сферические керамические элементы) [7.10]. Зазоры между отдельными элементами заполняют полимерным или металлическим мат-

ричным материалом, придающим сдвиговую прочность керамическому слою.

На рис. 7.7*а* приведена фотография дискретной композитной керамической бронепанели LIBA (Light Improved Ballistic Armor), разработанной израильской фирмой Mofet Etzion Ltd. Имея высокую живучесть, эта панель сохраняет относительную гибкость (рис. 7.7*б*). Аналогичные бронепанели выпускает французская фирма «ARES».



а *б*

Рис. 7.7. Дискретная композитная керамическая броня LIBA: *а* – таблетки из перспективной керамики; *б* – готовая керамическая панель.

Подробности устройства дискретной керамической брони можно найти в описании патента [7.13].

ЛИТЕРАТУРА

7.1. ГОСТ Р 50744-95. Бронеодежда. Классификация и общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 22 с.

7.2. Штамповка взрывом / Под ред. М.А. Анучина. М.: Машиностроение, 1972. – 152 с.

7.3. Galvez F., Cendon D., Sanchez–Galvez V. Experimental and numerical comparison of failure of ceramic tiles impacted by FSP's // Proceedings of the Twenty First International Symposium on Ballistics – Adelaide, Australia. – 2004.

7.4. Ravid M., Bodner S.R., Chochron I.S. Penetration analysis of ceramic armor with composite material backing // Proceedings of the Nineteenth First International Symposium on Ballistics – Interlaken, Switzerland, 2001.

7.5. Walker J.D., Anderson Ch.E. An analytical model for ceramic–faced light armors // Proceedings of the Seventeenth First International Symposium on Ballistics – Midrand, South Africa. – 1998.
7.6. Chochron I.S., Sanchez– Galvez V., Walker J.D., Anderson C.E. Analytical study and optimization of ceramic composite armours to a range of projectile threats // Proceedings of the Seventeenth First International Symposium on Ballistics – Midrand, South Africa. – 1998.
7.7. Chochron I.S., Sanchez–Galvez V. An analytical model to design ceramic/composite armours // Proceedings of the Seventeenth First International Symposium on Ballistics – Midrand, South Africa. – 1998.
7.8. Zaera R., Galvez F., Rodriguez J. Designe ceramic–metall armours against medium caliber projectiles // Proceedings of the Seventeenth First International Symposium on Ballistics – Midrand, South Africa. – 1998.
7.9. Сагомонян А.Я. Проникание. – М.: МГУ, 1974. – 300 с.
7.10. В.А. Григорян, Дашевская О.Б., Егоров А.И., Хромушин В.А. Баллистические свойства органо-керамических панелей для использования в средствах индивидуальной защиты / Труды 8-ой Всероссийской конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». Т.1. – СПб.: НПО СМ, 2005. –272 с.
7.11. Reijer P.C., Usselstein R.R. A novel flash X–ray technique to determine projectile ceramic armour interaction / Proceedings of the Twelfth International Symposium on Ballistics – San Antonio, Texas. – 1990.
7.12. Концептуальные основы создания средств индивидуальной защиты. Часть I. Бронежилеты. Под общ. ред. В.Г. Михеева. М.: Межакадемическое изд. «Вооружение. Политика. Конверсия», 2003. – 340 с.
7.13. Patent US 2007/0089597. F41H 5/02. Lightweight Composite Armor / Zheng-Dong Ma. – 2007.

Глава 8. ПРОЗРАЧНАЯ БРОНЯ

8.1. Прозрачные бронематериалы

Прозрачная противопульная и противоосколочная броня используются для изготовления пулезащитных окон автомобилей, самолетов и вертолетов, банков и офисов. В СИБ прозрачная броня используется для изготовления забрал для шлемов и смотровых окон для бронещитов.

Кроме противопульной стойкости, прозрачная броня должна обладать необходимым уровнем прозрачности.

В качестве материалов для изготовления прозрачной брони наиболее широко используются неорганические стекла (в дальнейшем – просто стекла) и прозрачные полимеры, которые называют органическими стеклами. Более высокими защитными свойствами обладают высокотвердые прозрачные керамические материалы: сапфир – монокристальный оксид алюминия Al_2O_3, поликристаллический оксидонитрид алюминия $Al_{23}O_{27}N_5$, магнийалюминиевый шпинель $MgAl_2O_4$ [8.1]. Широкому использованию этих материалов в СИБ препятствует их высокая стоимость.

Стекло – макроскопическое однородное аморфное вещество, полученное при затвердевании сплава стеклообразующих оксидов: SiO_2, Al_2O_3, B_2O_3, P_2O_5 и др. Для понижения температуры плавления к стеклообразующим оксидам добавляют оксиды щелочных металлов вида Me_2O и MeO (например: Na_2O, K_2O, CaO и др.). В зависимости от состава стекла подразделяют на силикатные, алюмосиликатные, боросиликатные, алюмоборосиликатные и т.д. Плотность обычных стекол изменяется в диапазоне 2,2..3,0 г/см^3. Кварцевое стекло имеет плотность 2,2 г/см^3; щелочные силикатные стекла (оконные) – 2,5 г/см^3; боросиликатное стекло – 2,2 г/см^3 (более легкое и более прочное).

Силикатные стекла имеют очень сложную полимерно-кристаллитную структуру (рис. 8.1 [8.2]): основу образует про-

странственная сетка из однородных звеньев – полиэдров, а кристаллиты SiO_2 являются частью этой сетки. В такой структуре нельзя выделить направления скольжения, поэтому стекла являют-

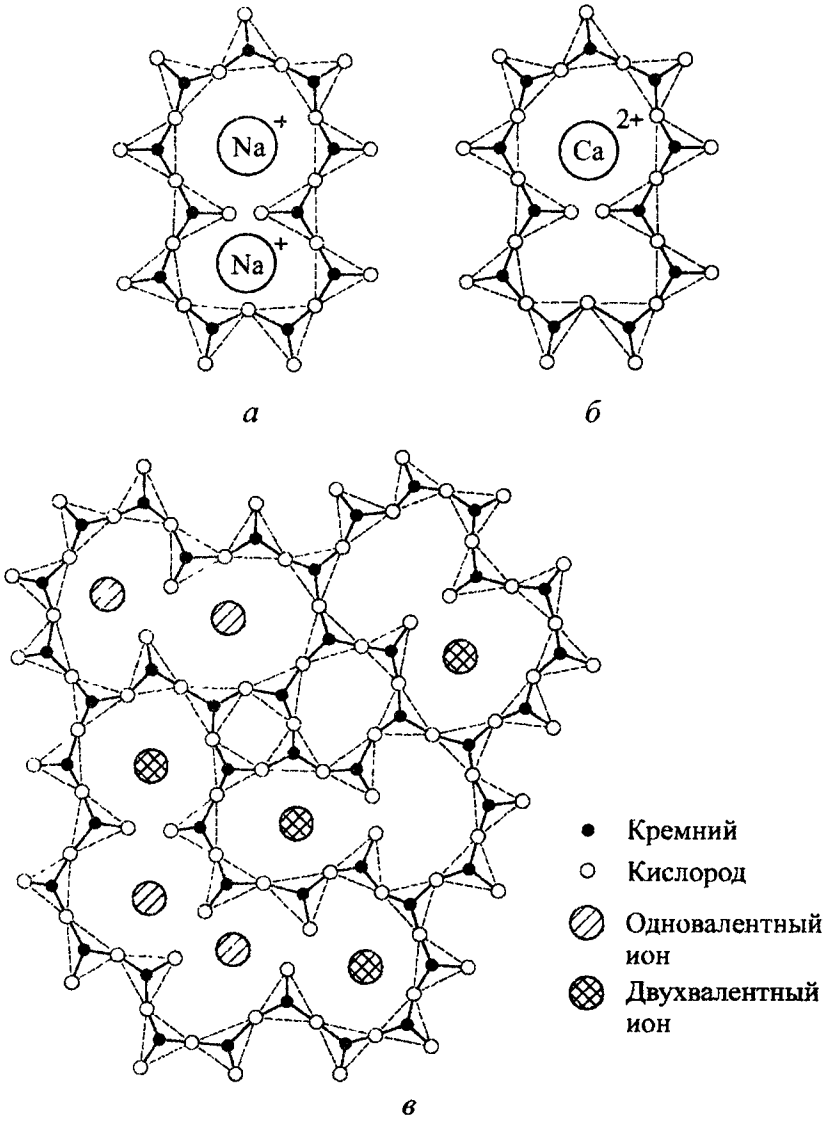


Рис. 8.1. Схематическое представление полимерно-кристаллитной структуры стекла: *а* – силикатно-натриевое стекло; *б* – силикатно-кальциевое стекло; *в* – структура стекла, содержащего как одно- так и двухвалентные модифицирующие ионы

ся очень хрупким, твердым и жестким материалом. При деформации вплоть до момента разрушения стекло можно считать упругим материалом, подчиняющимся закону Гука.

Теоретическая прочность стекла достигает 10 ГПа, но фактическая прочность на разрыв в 100...1000 раз ниже. Согласно теории Гриффитса, столь значительное различие между теоретической и фактической прочностью стекла обусловливается наличием микротрещин, образующихся как внутри, так и на поверхности образца. При растяжении образца стекла на краях микротрещин возникают большие перенапряжения (эффект концентрации напряжений), которые и обусловливают распространение трещин. Для стекла, как и для керамики, характерны малые значения коэффициента трещиностойкости K_{1c}.

Установлено, что количество микротрещин, образующихся при охлаждении, обработке и эксплуатации стекла может изменяться от нескольких единиц до нескольких тысяч на 1 $см^2$ поверхности. В соответствии с этим прочность силикатного стекла на разрыв изменяется примерно от 6 ГПа до 5 МПа (примерно в 1000 раз). Нижняя граница отвечает обычному оконному стеклу с дефектным поверхностным слоем, верхняя граница определена при испытаниях в вакууме стеклянных образцов, полученных из хорошо гомогенизированной стекломассы и обработанных плавиковой кислотой для удаления дефектного поверхностного слоя. Наибольшую прочность имеют малощелочные стекла и кварцевое стекло, наименьшую – щелочные стекла. Вода отрицательно сказывается на прочности стекла.

Прочность при сжатии у хрупких материалов существенно превосходит прочность на растяжение (примерно в 10 раз). Это обусловлено тем, что сжимающие усилия, в отличие от растягивающих, могут передаваться через существующие трещины, не приводя к концентрации напряжений. Модуль упругости для различных стекол изменяется в пределах 45...85 ГПа (для оконного стекла – 68 ГПа), микротвердость – 4...7 ГПа.

Для изготовления прозрачной брони как правило используют упрочненные стекла. Упрочнение стекла осуществляют сжатием поверхностных слоев стекла при химико-термической обработке и поверхностной закалке или растворением поверхностного дефектного слоя.

При химико-термической обработке натрий-силикатного стекла в ванне с расплавленной солью K_2SO_4 происходит реакция ионного обмена

$$K^+_{соль} + Na^+_{стекло} \leftrightarrow K^+_{стекло} + Na^+_{соль},$$

в результате которой в поверхностном слое ион Na^+ замещается ионом K^+. Поскольку размер иона K^+ на 30% превышает размер иона Na^+, то образуется сжатый поверхностный слой. Хотя толщина этого слоя мала (доли миллиметра), он препятствует распространению трещин до тех пор, пока внешние растягивающие напряжения не превысят предварительно созданные напряжения сжатия. Прочность стекла при химико-термической обработке увеличивается в несколько раз.

При поверхностной закалке осуществляется нагревание стекла выше температуры стеклования с последующим быстрым охлаждением воздухом или маслом. При этом в поверхностном слое возникают сжимающие напряжения, а во внутренних слоях – растягивающие. Прочность стекла повышается в 2...4 раза. Закалка эффективна для стеклянных листов с толщиной большей 2,5 мм. При разрушении закаленного листа образуются осколки без острых кромок.

Удалить внешний дефектный слой стекла можно травлением в растворе плавиковой кислоты. Прочность стекла при этом возрастает примерно в 10 раз. Однако проблема состоит в том, что трудно сохранить стекло в бездефектном состоянии, поскольку легкое касание его поверхности (не говоря уже об ударе пули) снижает его прочность на 1–2 порядка. Для сохранения прочности стекла необходимы защитные слои из прозрачных полимерных пленок. О значительно более высокой баллистической стойкости силикатного стекла с удаленным внешним дефектным слоем сообщается в работе [8.3].

При ударе по пластине, закрепленной или опертой по контуру, возникают два типа напряжений: обычные изгибающие напряжения и локальные напряжения в области воздействия (при упругом ударе их называют напряжениями Герца). При отсутствии проникания ударника разрушение возникает на тыльной поверхности упруго-хрупкой пластины, которая вследствие прогиба растягивается. Рассмотренные способы упрочнения стекла наиболее эффективны

для увеличения его прочности при динамическом изгибе в области упругих деформаций.

При высокоскоростном баллистическом ударе, сопровождающемся внедрением ударника в пластину, одним поверхностным упрочнением не обойтись. Поскольку стекло является высокотвердым упруго-хрупким материалом, то закономерности его пробития такие же, как у керамики. После начальной стадии взаимодействия ударника с преградой впереди проникающего тела образуется волна разрушения, представляющая собой сетку трещин [8.2, 8.4]. Чтобы остановить распространение фронта волны разрушения, следует использовать многослойные прозрачные преграды, которые содержат поверхности раздела, препятствующие распространению трещин. Впереди вершины трещины движется зона растяжения. При подходе к поверхности раздела с невысокой прочностью на растяжение трещина не может передаться в следующий слой преграды и будет остановлена.

Одна из наиболее известных многослойных прозрачных преград – триплекс. Триплекс представляет собой многослойную преграду, в которой стеклянные и полимерные слои склеены прозрачным полимерным клеем (рис. 8.2). В качестве клея используют поливинилбутираль, акрил, полиуретановый клей и др. Образующаяся после полимеризации клея пленка является барьером для распространяющихся трещин. Роль лицевого слоя стекла заключается, во-первых, в локализации высокого пика давления, формирующегося на начальной ударно-волновой стадии взаимодействия пули с преградой (смотри главу 6), во-вторых, в разрушении средства поражения, преобразовании сосредоточенного воздействия в распределенное на большую площадь и поглощении части кинетической энергии средства поражения. Поэтому лицевые слои целесообразно изготовлять из упрочненных стекол или даже прозрачных керамик. Для предотвращения проникновения вторичных (откольных) осколков в защищаемую зону тыльный слой многослойных бронестекол изготовляется из прозрачного пластичного полимера – поликарбоната или покрывается защитной прозрачной полимерной пленкой. Фотография трехслойной прозрачной преграды после воздействия пули пистолета ПМ приведена на рис. 8.3.

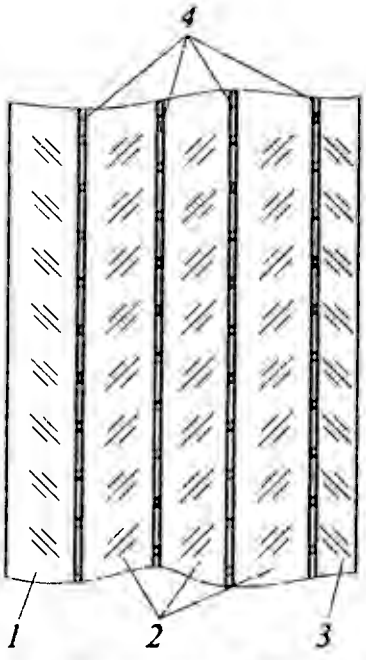


Рис. 8.2. Схема многослойной прозрачной брони: 1 - высокотвердый лицевой слой; 2 – слои стекла; 3 – слой поликарбоната; 4 – прозрачный клей.

Рис. 8.3. Трехслойная прозрачная преграда после воздействия пули пистолета ПМ (состояние лицевой поверхности)

Органические стекла представляют собой полимерные материалы с аморфной структурой, обеспечивающей высокую прозрачность. В многослойных защитных преградах используются чаще всего поликарбонат и полиметилметакрилат (ПММА).

Поликарбонат – термопластичный полимер на основе дифенил-пропана, более известный как дифлон или лексан. Он обладает следующими свойствами: плотность ρ =1,12 г/см^3, прочность на растяжение $\sigma_{вр}$= 60..70 МПа, прочность на сжатие $\sigma_{вс}$ = 80..90 МПа, относительное удлинение при разрыве δ = 50...100 %. ПММА характеризуется высокой прозрачностью и имеет более высокую прочность. Его недостатком является низкая ударная вязкость. Если у поликарбоната ударная вязкость достигает 1000 кДж/м^2, то у ПММА она равна 17 кДж/м^2, а относительное удлинение при разрыве δ = 2...3 %. Для сравнения некоторые свойства стекол и прозрачных полимеров приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Некоторые свойства стекол и прозрачных полимеров

Свойства	Стекло		Оргстекло		
	Оконное	Боросиликатное	Полиуретан	ПКБ	ПММА
Плотность, г/см^3	2,5	2,2	1,26	1,12	1,19
Предел прочности при растяжение, МПа	90	95	69	60...70	70
Предел прочности при сжатии, МПа	1000	1000	–	80...90	100... 106
Модуль сдвига G, ГПа	33,3	25,8	8,0	8,76	–
Светопропускание, %	87	89	80	86	92

Органические стекла имеют примерно в 2 раза меньшую плотность по сравнению с минеральными стеклами. Вследствие невысокой твердости и малой прочности преимуществ по пулестойкости по сравнению со стеклами практически не имеют, так как для обеспечения защиты с их помощью от типовых средств поражения необходимы большие толщины преград, что крайне неудобно. Поэтому их используют в многослойной прозрачной броне в качестве промежуточных (ПММА) или тыльных (поликарбонат) слоев. При

правильно подобранной толщине лицевого стеклянного слоя тыльный поликарбонатный слой не пробивается, но образуется характерная тыльная выпучина (рис. 8.4). Таким образом, слой поликарбоната играет роль энергоемкой подложки, поглощающей при своем деформировании остаточную кинетическую энергию.

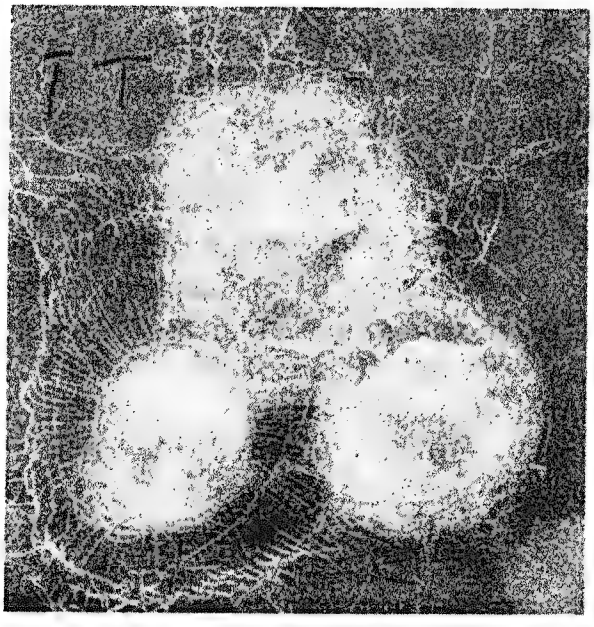


Рис. 8.4. Тыльные выпучины на многослойной прозрачной преграде после воздействия пули пистолета ТТ

8.2. Баллистическая стойкость многослойных прозрачных преград

Основная задача, возникающая при разработке многослойной прозрачной брони, состоит в минимизации массы при сохранении заданного уровня пулестойкости за счет оптимального сочетания толщин тяжелых стеклянных и легких полимерных слоев.

Двухслойные бронестекла, используемые в бронешлемах, при толщине 15...20 мм и поверхностной плотности 18...23 кг/м^2 обеспечивают защиту от пуль по 1 классу (ГОСТ Р 50744-95), а также от осколков, летящих со скоростью до 700 м/с.

Для защиты по второму классу используются, как правило, трехслойные бронестекла, суммарная толщина которых совместно с прослойками клея и тыльной противоосколочной пленкой составляет 20...24 мм.

Для защиты от автоматных и винтовочных пуль используются бронестекла с 4...8 слоями стекла и с тыльным слоем либо из поликарбоната, либо из осколкоулавливающей полимерной пленки. В зависимости от качества используемого стекла количество слоев и суммарная толщина бронепакета изменяются в пределах: 3...4 классы защиты – 4...5 слоев, 28...40 мм; 5-ый класс защиты – 5...6 слоев, 36...60 мм; 6-ой класс защиты – 7...8 слоев, 55...90 мм.

Значительно более высоких результатов удалось достичь в работе [8.3], в которой в качестве внутреннего слоя трехслойной прозрачной преграды использовалось силикатное стекло толщиной 10 мм с удаленным в растворе плавиковой кислоты внешним дефектным слоем. Тыльный слой преграды состоял из поликарбоната (лексана) толщиной 4 мм. Для защиты от винтовочных пуль и цилиндро–конических ударников из малоуглеродистых пластичных сталей массой до 9,5 г и имеющих скорость 700...720 м/с в качестве лицевого слоя достаточен 3-миллиметровый слой обычного стекла. Лицевой слой в данном случае как бы берет на себя начальную ударно-волновую стадию взаимодействия ударника с преградой – локализует высокий ударно-волновой пик давления и связанное с ним разрушение, а слой клея предохраняет следующий слой упрочненного стекла от передачи трещин. Поскольку твердость упрочненного химической обработкой стекла (HV = 6,4 ГПа) превосходит твердость пуль и ударников из малоуглеродистых сталей (HV = 1...2 ГПа), проникания в него не происходит до тех пор, пока стекло не потеряет прочность в результате формирования зоны разрушения по механизму, рассмотренному в главе 6. В течение времени формирования зоны разрушения происходит срабатывание пули без ее проникания в преграду.

При воздействии пуль с ТУС, таких, как Б-32, лицевой слой преграды должен иметь твердость, существенно превосходящую твердость материала ударника (HV до 8 ГПа), а гюгониевский предел упругости должен превосходить возникающее на начальной стадии ударно-волновое давление в преграде. Только в этом случае удается обеспечить жесткость преграды, достаточную для разру-

шения термоупрочненных сердечников высокоскоростных пуль без проникания в преграду. В работе [8.3] в качестве высокотвердого лицевого слоя использовались пластины сапфира, толщиной 4, 6 и 2×4 мм. Пуля Б-32 калибра 7,62 мм при скорости 836 м/с не пробивает многослойную прозрачную преграду, состоящую из пластины сапфира толщиной 6 мм, 3 мм (обычного)+10 мм (упрочненного) стекла и 4-миллиметрового слоя поликарбоната. Использование в лицевом слое двух 4-миллиметровых пластин сапфира обеспечивает стойкость к воздействию пули Б-32 при скорости 855 м/с. Таким образом, введение лицевого слоя из сапфира и использование упрочненного стекла позволяет более чем в три раза уменьшить толщину и массу многослойной прозрачной брони, обеспечивающей защиту по 6а классу.

К таким же выводам пришли в работе [8.5], в которой в экспериментах по исследованию стойкости многослойных прозрачных преград вместо дорогостоящего сапфира использовали непрозрачную высокоплотную мелкозернистую керамику Al_2O_3. В качестве средства поражения использовались бронебойные пули калибра 7,62 мм со стальным сердечником. Скорость соударения составляла 850 м/с. Исследуемые преграды с поверхностной плотностью 48...59 кг/м^2 с размерами 100×100 или 150×150 мм состояли из лицевого керамического слоя толщиной 1...8 мм, одного или двух слоев стекла суммарной толщиной 5...20 мм и тыльного слоя из поликарбоната толщиной 4 мм. Слои между собой не склеивались, а поджимались друг к другу двумя стальными рамками и стягивались болтами. В результате проведения экспериментов было установлено: 1) наличие 2-миллиметрового слоя керамики существенно увеличивало баллистическую эффективность преграды по сравнению с обычно используемыми многослойными прозрачными преградами из стекла и поликарбоната, останавливающими пулю при поверхностной плотности 135 кг/м^2 (боросиликатное стекло) и 163 кг/м^2 (натрийсиликатное стекло); 2) баллистическая стойкость преграды существенно возрастает при увеличении толщины керамического слоя до 4 мм, при дальнейшем ее увеличении до 8 мм прирост баллистической стойкости невелик; 3) полностью предотвратить проникание через прозрачную преграду с размерами

150×150 мм^2 удается при толщине керамического слоя большей 4 мм и суммарной поверхностной плотности преграды 56...59 кг/м^2.

Баллистическая стойкость многослойной прозрачной преграды с высокотвердым лицевым слоем зависит не только от его твердости, но и от жесткости следующих слоев, поперечных размеров преграды, длины сердечника и других параметров.

ЛИТЕРАТУРА

8.1. Pallet P.J., Gilde G.A., Dehmer P.G. Transparent Armor // The AMPTIC Newsletter, 2000, v.4, N3.

8.2. Сингх Брар Н., Эспиноза Х.Д. Обзор микрокинетики волн разрушения в силикатных стеклах // Химическая физика, 1998, №7.

8.3. Власов А.С., Зильбербранд Е.Л., Кожушко А.А. и др. Принципы прозрачной защиты от высокоскоростного удара // Труды международной конференции «VII Харитоновские научные чтения». Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. – Саров, РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2005.

8.4. Каннель Г.И., Разоренов С.В., Фортов В.Е. Волны разрушения в ударно-сжатом стекле // Материалы XIII симпозиума по горению и взрыву. – Черноголовка, 2005.

8.5. Strassburger E. Influence of Ceramic Thickness on the Ballistic Efficiency of Ceramic–Glass–Plastics Composites // Proceedings of the Twenty Third International Symposium on Ballistics – Tarragona, Spain, 2007.

Глава 9. БРОНЯ ИЗ НАНОМАТЕРИАЛОВ – ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Возможность применения того или иного материала для изготовления легкой брони определяется комплексом свойств, главными из которых являются: прочностные характеристики (модуль упругости, твердость, пределы текучести и прочности), предельное удлинение и, конечно, плотность материала. Поскольку броня при интенсивном локализованном динамическом воздействии высокоскоростных пуль и осколков работает в экстремальных условиях, для ее изготовления обычно используются материалы с экстремально высокими прочностными характеристиками и по возможности низкой плотности. К таким материалам относят рассмотренные выше синтетические высокомодульные материалы и изготовляемые на их основе полимерные композиционные материалы, высокопрочные металлические сплавы: бронестали, титановые и алюминиевые броневые сплавы; высокотвердые керамики и стекла.

Необходимость снижения массы защитных структур СИБ при сохранении или даже увеличении их защищающей способности требует разработки новых материалов с новыми химическим и фазовым составами и структурами. В конце XX века возникло новое направление кардинального улучшения функциональных свойств конструкционных материалов за счет формирования субмикрокристаллической структуры с размером зерен 1 мкм...100 нм и нанокристаллической структуры, для которой размер зерен не превышает 100 нм. Для получения объемных наноматериалов, например бронепластин, можно использовать порошковые технологии – компактирование нанопорошков, кристаллизацию из аморфного состояния и интенсивную пластическую деформацию [9.1, 9.2].

Механические свойства поликристаллических материалов существенно зависят от размера зерен. В общем случае связь между пределом текучести и размером зерна описывается соотношением

Холла–Петча $\sigma_т = \sigma_{т0} + \frac{k}{\sqrt{\delta}}$ с различным значением постоянной k для субмикрокристаллических и нанокристаллических материалов. Для материалов с субмикрокристаллической структурой рост прочности и твердости с уменьшением размера зерен обусловлен увеличением площади границ раздела, которые являются препятствием для движения дислокаций. Высокая прочность нанокристаллических материалов обусловлена низкой плотностью существующих в наночастицах дислокаций и трудностью их размножения. Качественная зависимость предела текучести от среднего размера зерна приведена на рис. 9.1. Микротвердость материалов нанокристаллической структуры в несколько раз превышает твердость крупнозернистых аналогов, при этом их пластичность остается достаточно высокой, что весьма важно для обеспечения противопульной стойкости бронепластин [9.1].

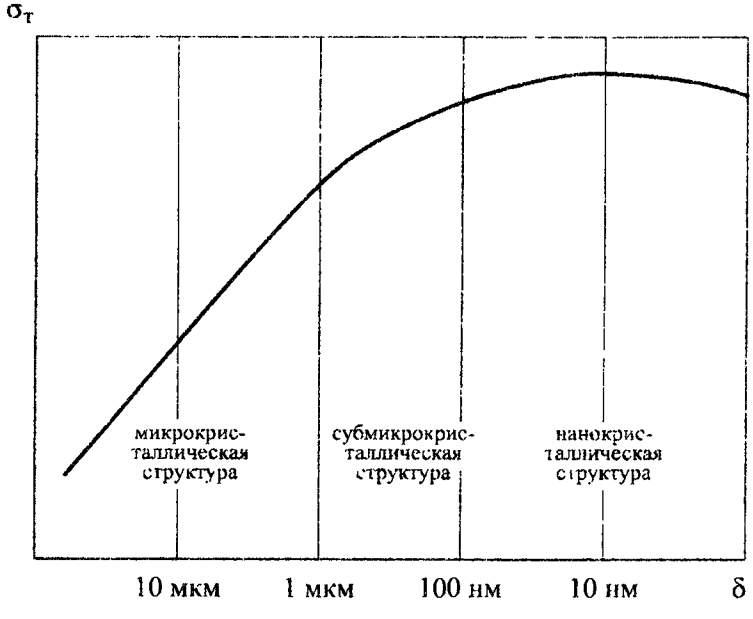


Рис. 9.1. Зависимость предела текучести упругопластичных материалов от размера зерна

Образцы из аустенитной стали 12Х18Н10Т, полученные прессованием порошка с размером частиц 100 нм, имеют предел текучести 1,34 ГПА, что в несколько раз больше предела текучести этой стали, полученной с помощью обычной технологии. При этом

предельное удлинение составляет 27% [9.3]. Существенно возрастают также прочностные характеристики титановых сплавов с субмикрокристаллической и нанокристаллической структурой (рис. 9.2) [9.4].

Слабым местом керамических материалов является их низкая трещиностойкость и отсутствие пластичности. Для нанокерамик обнаружена низкотемпературная пластичность [9.5], что позволяет надеяться на повышение их живучести в составе комбинированных защитных структур.

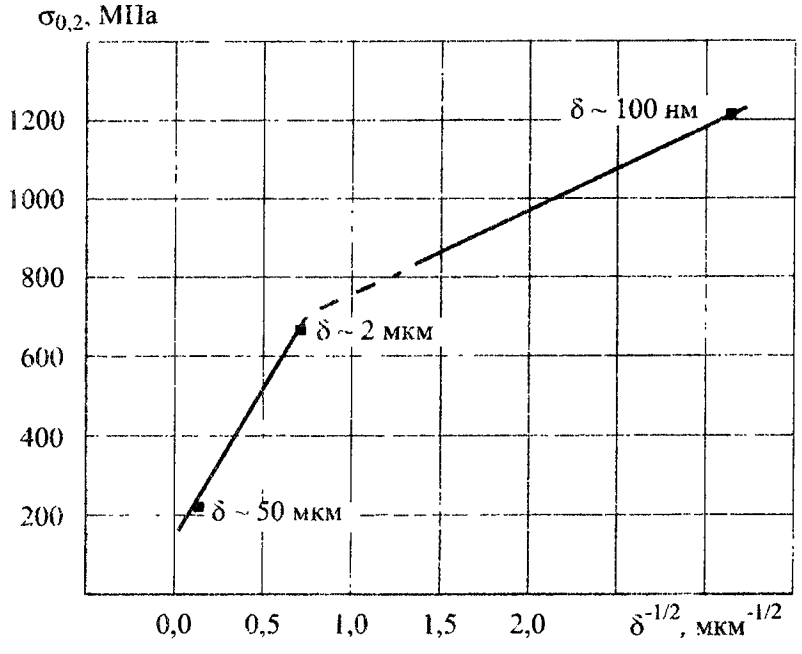


Рис. 9.2. Зависимость условного предела текучести титанового сплава ВТ1-0 от среднего размера зерна. Экспериментальные данные [9.2]

Неожиданное применение наноматериалы могут найти в увеличении защищающей способности текстильной брони путем ее пропитывания высококонцентрированной суспензией (коллоидной системой, состоящей из жидкости и мелкодисперсной твердой фазы), в которой в качестве дисперсной твердой фазы выступают наночастицы [9.6, 9.7]. При увеличении скорости сдвига вязкость таких суспензий сначала убывает, а затем быстро возрастает. При деформировании с малыми скоростями сдвига жидкая фаза выступает в роли смазки и не препятствует деформациям формоизмене-

ния суспензии. При высокой скорости сдвиговых деформаций гидродинамические силы, возникающие в суспензии, приводят к образованию взаимодействующих кластеров из дисперсных частиц, препятствующих развитию сдвига в суспензии – она как бы твердеет. Таким образом, высококонцентрированные суспензии из наночастиц при низких скоростях деформации проявляют себя как вязкие жидкости, а при высоких – как твердые тела. Поскольку при баллистическом ударе реализуются высокие скорости деформации, жидкая в обычных условиях преграда из суспензии на основе наночастиц при прострелe пулей ведет себя как твердая, поэтому в литературе ее часто называют «жидкой броней». При пропитывании текстильной брони такой суспензией можно ожидать увеличения ее защищающей способности.

В работе [9.6] сообщается об исследовании защищающей способности текстильного бронепакета из кевлара, пропитанного полиэтиленгликолевой суспензией кремниевых наночастиц размером 450 нм с объемным содержанием 52%. Пропитанный текстильный бронепакет имеет примерно такую же стойкость, как и не пропитанный равной массы, но вследствие меньшей толщины обладает большей гибкостью. Кроме этого, пропитанный текстильный бронепакет становится устойчивым к «прокалывающему» действию тонких заостренных тел. Увеличение баллистической эффективности пропитанного суспензией пакета авторы [9.6] связывают с увеличением силы сопротивления вытягиванию нитей из ткани при торможении пули и их раздвиганию при «прокалывающем» воздействии. При этом нужно иметь в виду, что при пропитывании из-за увеличения линейной плотности нитей снижается скорость распространения в них продольных и поперечных волн, что может отрицательно сказаться на стойкости бронепакета, поскольку ограничивает основной механизм поглощения кинетической энергии ударника путем ее преобразования в упругую энергию растяжения нитей.

Совершенно другой путь конструирования брони из наноматериалов состоит в использовании так называемых нанотрубок, однослойных и многослойных. Наиболее исследованы углеродные нанотрубки. Углеродную нанотрубку можно представить себе как лист графита из одного или нескольких атомных слоев, свернутый в цилиндр. Однослойная углеродная нанотрубка может иметь диаметр 2 нм и длину 100 мкм, что делает ее квазиодномерной струк-

турой. Углеродные нанотрубки характеризуются высоким модулем упругости около 1,0 ТПа (у стали 0,21 ТПа) и пределом прочности до 45 ГПа [9.8]. Понятно, что использование таких материалов для изготовления или хотя бы упрочнения текстильной или композитной брони способно совершить революцию в разработке защитных структур СИБ.

В [9.9] сообщается о разработке прозрачной пленки толщиной 50 нм, состоящей из множества многослойных нанотрубок длиной 245 мкм и диаметром 10 нм и имеющей плотность 0,5 г/см^3. Пленка обладает высокой прочностью и может быть использована для производства прозрачной брони.

Многие ведущие научно-исследовательские лаборатории мира имеют весьма обширные планы и хорошо финансируемые программы разработки новых бронематериалов на основе использования достижений нанотехнологий [9.9]. Но сегодня наноматериалы весьма дороги, хотя интенсивные поиски новых материалов и технологий производства быстро ведут к их удешевлению [9.2, 9.9, 9.10].

ЛИТЕРАТУРА

9.1. Лякишев Н.П., Алымов М.И. Наноматериалы конструкционного назначения // Российские нанотехнологии, 2006, Т.1, №1.

9.2. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. – М.: Техносфера, 2005.

9.3. Косицин И.И., Сагарадзе В.В., Копылов В.И. // ФММ, 1999. Т. 88, № 5.

9.4. Кайбышев О.А., Утяшев Ф.З. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов. М.: Наука, 2002.

9.5. Шевченко В.Я., Баринов С.М. Прочность технической керамики. М.: Наука, 1999.

9.6. Wagner N.J., Wetzel E.D. Protective fabrics utilizing shear thickening fluids (STFs) // The 4-th Conference on Safety and Protective Fabrics. USA, Pittsburg, 2004.

9.7. Body Armor – Technological Issues // Military Technology, 2006, №4.

9.8. Елецкий А.В. Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе // Успехи физических наук, 2007, т. 177, №3.

9.9. Наноматериалы. Нанотехнология. Наносистемная техника. Мировые достижения за 2005 год / Под ред. П.П. Мальцева. – М.: Техносфера, 2006.
9.10. Альтман Ю. Военные нанотехнологии. – М.: Техносфера, 2006.

Глава 10. ЗАБРОНЕВОЕ ДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРА ПУЛЬ ПРИ НЕПРОБИТИИ БРОНЕЗАЩИТЫ

10.1. Общая характеристика заброневого действия

Механическая взаимосвязь элементов бронезащиты СИБ с телом человека обусловливает передачу ему части импульса и энергии пули или осколочного поражающего элемента. И, несмотря на то, что современные бронежилеты весьма эффективно предотвращают проникание в заброневое пространство пуль и осколков, очень часто их заброневое действие при непробитии бронезащиты приводит к так называемой тупой контузионной травме, локализованной в области воздействия. Механизмы заброневого действия так или иначе связаны со смещением бронеэлемента и проявляются в виде: 1) волнового нагружения тела человека ударными волнами, переходящими из бронеэлемента в контактирующие с ним мягкие ткани; 2) локального ударного нагружения тела человека смещающимся бронеэлементом или образующимся в нем деформационным куполом – выпучиной; 3) ускорения тела или его части за счет передачи механического импульса бронеэлемента, приведенного в движение ударным воздействием пули или осколка.

Тяжесть заброневой контузионной травмы определяется амплитудными значениями, временем действия и местом локализации нагрузок, действующих на тело человека. Всего степеней тяжести травмы четыре – от I легкой до IV крайне тяжелой (летальной). ГОСТ 50744-95 на защитную бронеодежду допускает заброневую травму не выше II-ой (средней) степени тяжести. Общими признаками такой травмы являются: ушибленные раны, очаговые внутримышечные кровоизлияния, единичные очаговые кровоизлияния в брыжейку кишечника, множественные субплевральные кровоизлияния. Вследствие кратковременного болевого шока возможна утрата боеспособности на 3...5 мин. Ограниченная боеспособность наблюдается до 10 суток, полное восстановление насту-

пает через 15...20 суток. Травма III степени тяжести (тяжелая травма), сопровождающаяся закрытыми и открытыми переломами ребер и отростков позвонков, разрывами плевры, кровоизлияниями в паренхиму легких, сердца и другими серьезными повреждениями внутренних органов, не допускается.

Однако для разработчиков бронежилетов требование недопустимости забронебой травмы выше второй степени тяжести мало что говорит. Это требование необходимо перевести на язык понятный инженерам, например, ввести ограничение на амплитуду волны сжатия, нагружающей ткани и внутренние органы некоторой пороговой величиной, ввести допустимые величину тыльного прогиба бронеэлемента и скорости его роста и др. По существу необходимо определить динамические характеристики тканей, отдельных органов и частей человеческого тела. Для этого необходимо изучить механизмы возникновения тех или иных повреждений тканей и внутренних органов в зависимости от интенсивности воздействия поражающих факторов забронебого действия. Проведение прямых экспериментов in vivo, с помощью которых можно было бы получить достоверные значения пороговых уровней воздействия на тело человека, невозможно.

Все используемые в настоящее время методы изучения забронебой контузионной травмы можно разделить на три большие группы. В первой группе в качестве объектов исследования используются небиологические макеты мягких тканей человека из тканеэквивалентных материалов, макеты–имитаторы фрагментов тела человека, например, головы или грудной клетки, антропоморфные манекены. Во второй группе баллистическому воздействию подвергаются биологические объекты (различного вида подопытные животные после обезболивания), костно-мышечные препараты и др. Третья группа методов основана на непосредственном изучении забронебых тупых контузионных травм у раненых бойцов во время их лечения.

По очевидным причинам наибольшее распространение среди разработчиков и производителей бронежилетов получили методы испытания с использованием небиологических макетов мягких тканей человека. Чаще всего в качестве макетов мягких тканей человека используются либо пластичные материалы, такие как пластилин, глина, мастика, либо водные – 10...20%-ные гели из желатина

или вязкие жидкости типа жидкого мыла, плотность которых близка к плотности мягких тканей. Большинство недостатков этого метода связано с тем, что с помощью макетов невозможно воспроизвести все свойства мягких тканей человека, влияющие на тяжесть забронеевой травмы.

Пластичные материалы позволяют характеризовать забронеевое травматическое воздействие на защищаемый объект остаточными размерами кратера, образующегося после баллистического удара пули или осколка по защитному бронеэлементу, расположенному, например, на пластилиновом блоке. При тщательном соблюдении однообразия свойств пластичных материалов удается получить объективные сравнительные данные о травматической опасности испытуемых бронеэлементов при воздействии одних и тех же средств поражения. Основной характеристикой травмоопасности может служить, например, глубина кратера в пластичной подложке. Сопоставляя получаемые в экспериментах глубины кратеров с тяжестью ранения бойцов в аналогичных условиях баллистического воздействия, определяют допустимые характеристики воздействия. Предельно допустимыми глубинами кратеров, образующихся в пластилиновых подложках из мягкой модельной глины Roma Plastilina №1, закрытых текстильной броней, при воздействии пистолетных и револьверных пуль, имеющих скорость 300...450 м/с, являются: в США – 44 мм, в Германии – 20 мм, в России – 22 мм [10.1]. Полученные значения не являются универсальными. При увеличении скорости средства поражения допустимая глубина кратера уменьшается, например, для стального шарика диаметром 6,3 мм при скорости 500...700 м/с она составляет 10...15 мм [10.1].

Жидкотекучие макеты мягких тканей позволяют с использованием рентгеноимпульсной и высокоскоростной оптической (необходима прозрачность макета) съемки исследовать забронеевое травматическое воздействие на защищаемый объект в динамике. Большое значение имеет измерение давления в макетах с помощью различных измерительных преобразователей.

10.2. Особенности забронеевого действия

В результате экспериментальных исследований забронеевого действия при баллистическом ударе по мягким и жестким защитным бронеэлементам, установленным на желатиновых блоках, а

также на подопытных животных, были обнаружены следующие два факта.

1. Взаимодействие пули с защитным бронеэлементом сопровождается формированием временной полости за бронеэлементом (рис. 10.1). Как показывает анализ рентгеновских снимков, размеры временной полости зависят как от типа защитного бронеэлемента, так и от кинетической энергии пули и определяют, в основном, степень тяжести забронебой контузионной травмы, поскольку характеризуют величину кинетической энергии, передаваемой защищаемому объекту [10.1].

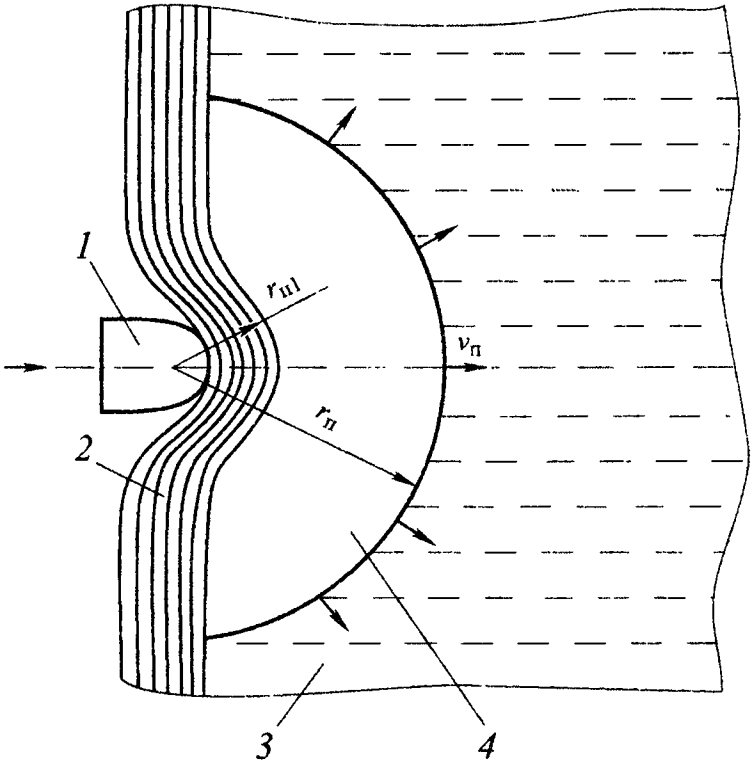


Рис. 10.1. Схема формирования временной полости в желатиновом блоке: 1 – пуля; 2 – текстильный бронепакет; 3 – желатиновый блок; 4 – временная полость

2. Профиль давления в желатиновом блоке, подвергнутом баллистическому удару со стороны расположения бронеэлемента, состоит из двух импульсов давления (рис. 10.2): первый импульс давления амплитудой в несколько мегапаскалей и длительностью около 100 мкс формируется в начальный момент взаимодействия пули

с преградой и имеет ударно-волновую природу. Для регистрации таких импульсов необходимы измерительные преобразователи с достаточно высокой частотой собственных колебаний ~ 100 кГц, поэтому в литературе этот импульс часто называют высокочастотным.

Второй пологий (низкочастотный) импульс давления имеет амплитуду примерно на порядок меньшую (несколько десятых долей МПа) и формируется с большой задержкой около одной или нескольких миллисекунд после удара и имеет существенно большую длительность – около 10...15 мс [10.1]. Эти данные были получены при обстреле пулями пистолета ПМ желатиновых блоков, имеющих размеры 20×20×28 см, на фронтальной поверхности которых устанавливались мягкие бронеэлементы из 30 слоев ткани ТСВМ. Для измерения давления в желатиновых блоках использовались сферические пьезоэлектрические преобразователи давления диаметром 5 мм, которые устанавливались на расстоянии 4 и 10 см от поверхности блока. При использовании жестких защитных бронеэлементов характеристики профиля давления несколько изменяются – время задержки между импульсами давления возрастает до 5...6 мс.

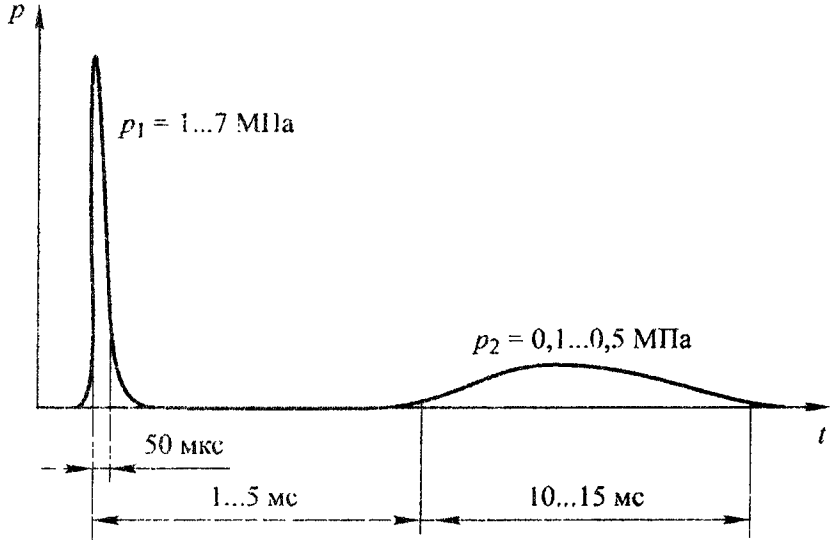


Рис. 10.2. Схематичное представление двухимпульсного профиля нагружения желатинового блока, закрытого текстильным бронепакетом.

10.3. Анализ физических процессов, сопровождающих забронебое действие

1. Динамика развития временной полости зависит от типа защитного бронеэлемента, энергии удара и толщины антитравматических амортизаторов. При использовании в качестве защитного бронеэлемента текстильной брони временная полость образуется в результате удара тыльной выпучины (деформационного купола) по защищаемому объекту. Для анализа процесса развития временной полости примем несколько предположений геометрического и физического характера. Во-первых, будем считать, что ударное воздействие и временная полость имеют сферическую симметрию. Во-вторых, в качестве модели мягких тканей примем модель несжимаемой жидкости.

Начальная скорость движения выпучины (деформационного купола) текстильной брони может быть определена исходя из закона сохранения импульса при неупругом соударении пули с броней

$$v_1 = \frac{mv_0}{m + M_{тп}},$$

где m – масса пули; v_0 – скорость пули в момент удара; $M_{тп}$ – присоединенная масса текстильного бронепакета. В последующие моменты времени скорость выпучивания деформационного купола из-за действия сил сопротивления, образующихся в результате натяжения нитей в бронепакете, быстро уменьшается (см. главу 3). В зависимости от толщины амортизатора, первоначально удар будет нанесен либо со скоростью v_1 (амортизатор отсутствует – бронеэлемент находится в непосредственном контакте с телом), либо с некоторой меньшей скоростью, зависящей от толщины амортизатора и его поверхностной плотности.

После удара своеобразного сферического поршня, состоящего из пули и присоединенной массы текстильной брони в жидкости формируется расходящееся сферически симметричное течение, для которого справедлива следующая зависимость массовой скорости жидкости v от радиальной координаты r, отсчитываемой от центра симметрии [10.2]

$$v = v_{\text{вп}} \left(\frac{r_{\text{вп}}}{r} \right)^2 ,$$

где $v_{\text{вп}}$, $r_{\text{вп}}$ соответственно скорость и радиус расширения временной полости. Кинетическая энергия $W_{\text{к}}$, приобретенная жидкостью, может быть вычислена следующим образом

$$W_{\text{к}} = \int_{r_{\text{вп}}}^{\infty} \frac{\rho v^2}{2} 2\pi r^2 dr ,$$

где ρ – плотность жидкости. Подставляя сюда зависимость массовой скорости жидкости от координаты и выполняя интегрирование, получим

$$W_{\text{к}} = \pi \rho r_{\text{вп}}^3 v_{\text{вп}}^2 .$$

Для дальнейшего важно понять, что совместное движение жидкости и текстильной брони вследствие интенсивного торможения деформационного купола будет происходить только в течение небольшого промежутка времени, после чего броня потеряет скорость, а жидкость продолжит движение по инерции, оторвавшись от деформационного купола, в результате чего начнет формироваться временная полость. Движение жидкости на этой стадии будет определяться кинетической энергией $W_{\text{к1}}$, запасенной ею до отрыва от брони. На основании закона сохранения энергии запишем баланс энергий и работ на стадии формирования временной полости

$$W_{\text{к1}} = W_{\text{к}} + \int_{r_{\text{вп1}}}^{r_{\text{вп}}} p^* 2\pi r^2 dr + A_{\text{вязк}} ,$$

где $W_{\text{к}}$ – текущая кинетическая энергия жидкости, p^* – гидростатическое давление, равное или большее атмосферного давления, $A_{\text{вязк}}$ – вязкая диссипация энергии. Второй член в правой части определяет работу против сил гидростатического давления. Вследствие относительно невысокой скорости течения жидкости (около 10...100 м/с) вязкой диссипацией кинетической энергии можно пренебречь. Тогда выполняя интегрирование, получим

$$\pi\rho r_{\text{впl}}^3 v_{\text{впl}}^2 = \pi\rho r_{\text{вп}}^3 v_{\text{вп}}^2 + p^* \frac{2}{3}\pi\left(r_{\text{вп}}^3 - r_{\text{впl}}^3\right).$$

Поскольку $v_{\text{вп}} = dr_{\text{вп}}/dt$, последнее уравнение позволяет получить дифференциальное уравнение для радиуса временной полости

$$\frac{dr_{\text{вп}}}{dt} = v_{\text{впl}}\sqrt{\left(\frac{r_{\text{впl}}}{r_{\text{вп}}}\right)^3 - \frac{2}{3}\frac{p^*}{\rho v_{\text{впl}}^2}\left[1 - \left(\frac{r_{\text{впl}}}{r_{\text{вп}}}\right)^3\right]}.$$

Максимальному диаметру временной полости $r_{\text{вп max}}$ соответствует равенство $dr_{\text{вп}}/dt = 0$, из которого следует приближенное соотношение для $r_{\text{вп max}}$

$$r_{\text{вп max}} = r_{\text{впl}}\sqrt[3]{\frac{3\rho v_{\text{впl}}^2}{2p^*}}.$$

Полагая для оценок $p^* = 10^5$ Па (1 атм), $\rho = 1000$ кг/м^3; $v_{\text{впl}} = 100$ м/с, $r_{\text{впl}} = 10...15$ мм, получим $r_{\text{вп max}} = 50...80$ мм. Если меньшее значение $r_{\text{п max}}$ вполне соответствует действительности [10.1], то большее вряд ли достижимо. Однако если учесть, что развитие временной полости происходит на фоне повышенного вследствие сжатия органов и тканей внутреннего давления p^*, то величина $r_{\text{п max}}$ будет существенно меньше, даже в случае большого размера начальной полости. Численное интегрирование дифференциального уравнения для радиуса временной полости показывает, что при выбранных значениях параметров задачи максимальный размер полости достигается через время $t_{\max}$ равное $48{,}2r_{\text{впl}}/v_{\text{впl}}$, что составляет 4,8...7,2 мс для указанного выше диапазона значений начального размера полости $r_{\text{впl}}$. Интересно отметить, что начальному размеру полости $r_{\text{впl}} = 10$ мм соответствует величина запасенной в жидкости кинетической энергии $W_{\text{кl}} = 31{,}4$ Дж (~ 10% от кинетической энергии пули ПСТ пистолета ПМ). Для формирования начальной полости размером $r_{\text{впl}} = 15$ мм требуется уже $W_{\text{кl}} = 106$ Дж, что составляет около 30% начальной кинетической энергии пули.

Здесь уместно сделать замечание, что несмотря на правдоподобность полученных оценок, не следует забывать, что рассматри-

вается очень простая механическая модель весьма сложного явления – забронебой контузионной травмы. Тем не менее, проведенный анализ ясно показывает, что размеры временной полости зависят не только от величины начального тыльного прогиба $r_{вп1}$ защищающей преграды, но и от максимальной скорости роста запреградного деформационного купола $v_{вп1}$.

Конечной целью проводимого анализа должно стать определение взаимосвязи между параметрами, определяющими процесс формирования временной полости, и степенью тяжести травмы. Степень тяжести забронебой контузионной травмы определяется, в основном, радиусом (глубиной) временной полости [10.1]. В соответствии с этим в качестве критерия поражения будем использовать максимальный радиус временной полости или ее объем. Тогда для недопущения травмы степени выше второй необходимо выполнение неравенства $r_{вп\ max} \le r_{пред}$, в котором $r_{пред}$ – предельный радиус динамической временной полости. Его превышение может привести к чрезмерным повреждениям и разрывам внутренних органов. Соотношение, связывающее допустимые значения $r_{вп1}$ и $v_{вп1}$, может быть получено из выражения для $r_{вп\ max}$, в которое вместо $r_{вп\ max}$ следует подставить $r_{пред}$

$$r_{вп1}^3 v_{вп1}^2 \le \frac{2}{3}\frac{p^* r_{прсд}^3}{\rho}.$$

В такой форме критерий имеет энергетический характер и по существу ограничивает величину кинетической энергии, которая может быть поглощена мягкими тканями при их ударном нагружении со скоростью несколько десятков метров в секунду. Полагая, что $r_{вп} \sim w_{max}$, $v_{вп1} \sim v_1$, получим критерий недопущения травмы выше второй степени тяжести в виде неравенства

$$w_{max}^3 v_1^2 \le Tr2,$$

в котором значение постоянной $Tr2$ соответствует второй степени тяжести забронебой тупой контузионной травмы и должно быть определено экспериментально. На пределе максимальный прогиб связан с начальной скоростью v_1 движения присоединенного участка бронеэлемента соотношением

$$w_{\max} = \sqrt[3]{\frac{Tr2}{v_1^2}} .$$

Что касается величины v_1, то об ее оценке говорилось в разделах, посвященных различным типам брони. В общем случае

$$v_1 = \frac{mv_0}{m + M_{\text{пр}}},$$

где $M_{\text{пр}}$ – присоединенная масса бронезащиты, пропорциональная ее поверхностной плотности $m_{\text{бз}}$ и зависящая от механизма поглощения кинетической энергии пули. Оценить величину $M_{\text{пр}}$ можно с помощью соотношения $M_{\text{пр}} = \pi d_{\text{отп}}^2 m_{\text{бз}}/4$, в котором $d_{\text{отп}}$ – диаметр отпечатка в пластилиновой подложке. В качестве $w_{\max}$ можно использовать глубину отпечатка в пластилиновой подложке. Таким образом оценить травмоопасность той или иной защитной структуры можно на основании данных баллистического эксперимента, в которых регистрируют не только глубину, но и диаметр отпечатка в пластилиновой подложке.

Предлагаемый критерий качественно правильно соответствует приведенным в [10.1] усредненным данным о предельно допустимых значениях глубин отпечатков при различных скоростях воздействия пуль и стальных шариков.

Наличие в составе комбинированного защитного бронеэлемента керамики в принципиальном плане ничего не меняет, поскольку при воздействии пули происходит локальное разрушение керамики с формированием конуса, который, воздействуя на органопластиковую подложку, приводит к локальному нагружению объекта защиты с формированием временной полости. Комбинированная керамикоорганопластиковая броня используется для защиты от высокоэнергетических средств поражения и ее пригодность определяется не только уровнем баллистической стойкости, но и способностью формировать запреградные деформационные купола с малым прогибом и относительно невысокой скоростью их роста.

Иначе обстоит дело при воздействии пуль на комбинированную металлотекстильную броню. При непробитии металлической бронепластины существенных локальных деформаций, как прави-

ло, не наблюдается. Импульс и энергия пули передаются всей бронепластине. Начальную скорость бронепластины $v_{бп}$ можно оценить исходя из предположения о неупругом характере ударного взаимодействия пули с бронепластиной

$$v_{бп} = \frac{mv_0}{m + M_{бп}},$$

где $M_{бп}$ – масса бронепластины. Полагая для оценок v_0 = 820 м/с, m = 9,6 г (характеристики пули ЛПС к СВД), $M_{бп}$ = 1,0…3,0 кг, получим $v_{бп}$ = 2,6…7,8 м/с.

Возникает вопрос – насколько опасен низкоскоростной удар по грудной клетке металлической пластиной массой несколько килограмм со скоростью несколько метров в секунду? Контактное нагружение такого типа характерно для многих аварийных ситуаций на транспорте – удар грудью о рулевое колесо, спинку переднего сидения, привязные ремни и т.п. Анализ экспериментальных данных по удару по грудной клетке (непроникающий удар по среднегрудинной области в направлении «грудь–спина»), приведенных в табл. 10.1 [10.3], показывает, что степень травмы слабо зависит от взятых в отдельности параметров ударника (масса, скорость) и даже от значения максимальной контактной силы.

Степень травмы оценивалась по условной шкале AIS (Abbreviated Injury Scale), в которой 0 обозначает отсутствие механических повреждений, 6 – повреждения, приводящие к смертельному исходу.

Таблица 10.1

Результаты ударного нагружения грудной клетки биоманекенов

Параметры ударника			Результаты воздействия			
Масса m, кг	Скорость v, м/с	Энергия W, Дж	Максимум контактной силы, кН	Деформация грудной клетки		Степень травмы
				абсолютная l, см	относительная, ε	
1,9	11,3	121	5,3	4,6	0,185	0,5
1,6	13,9	159	6,8	5,3	0,252	1
23,0	4,9	279	2,8	7,0	0,298	2,4
19,5	5,2	264	2,0	7,8	0,307	–
19,3	7,5	541	4,4	9,2	0,388	3,6
21,5	7.0	572	4,1	8,6	0,4	3,6

Окончание табл. 10.1

Параметры ударника			Результаты воздействия			
Масса m, кг	Скорость v, м/с	Энергия W, Дж	Максимум контактной силы, кН	Деформация грудной клетки		Степень травмы
				абсолютная l, см	относительная, ε	
5,5	13,9	531	4,8	8,1	0,395	4,0
22,9	10,0	1143	6,8	10,3	0,418	5,5
19,5	10,0	975	6,0	9,8	0,407	6,0

Сильнее всего степень травмы коррелирует с величиной относительной деформации ε грудной клетки в направлении грудь–спина, измеренной на уровне пятого грудного позвонка. В свою очередь, деформация ε и степень травмы СТ связаны с кинетической энергией удара $W_к$ следующими регрессионными соотношениями [10.3]

$$\varepsilon = -0{,}3 + 0{,}11 \ln W_к,$$

$$\text{СТ} = -11{,}0 + 2{,}4 \ln W_к,$$

$$\text{СТ} = -3{,}5 + 20{,}0\varepsilon.$$

В упрощенной постановке ответная реакция грудной клетки на удар бронепластины может быть описана с использованием одномерной четырехэлементной модели Лобделла (T. Lobdell) [10.3] со сосредоточенными параметрами. Блок-схема модели представлена на рис.10.3. Податливость покровных тканей передней стенки груди (масса m_2) имитируется элементом k_{12}. Большая часть массы внутренних структур грудного сегмента приписывается задней, «позвоночной» стенке (масса m_3).Упругие характеристики грудной клетки задаются элементом k_{23}, их нелинейное возрастание при больших деформациях – дополнительным элементом k_{23}^*. С учетом реальных характеристик тканей и структур упруговязкий элемент $\frac{\hat{k}_{23}}{\hat{c}_{23}}$ дополняется анизотропной вязкостью c_{23}. Уравнения модели для смещений x_i (i = 1...4) ударника и элементов грудной клетки относительно положения равновесия записываются так:

$$M_{\text{бп}} \frac{d^2 x_1}{dt^2} = -k_{12}(x_1 - x_2),$$

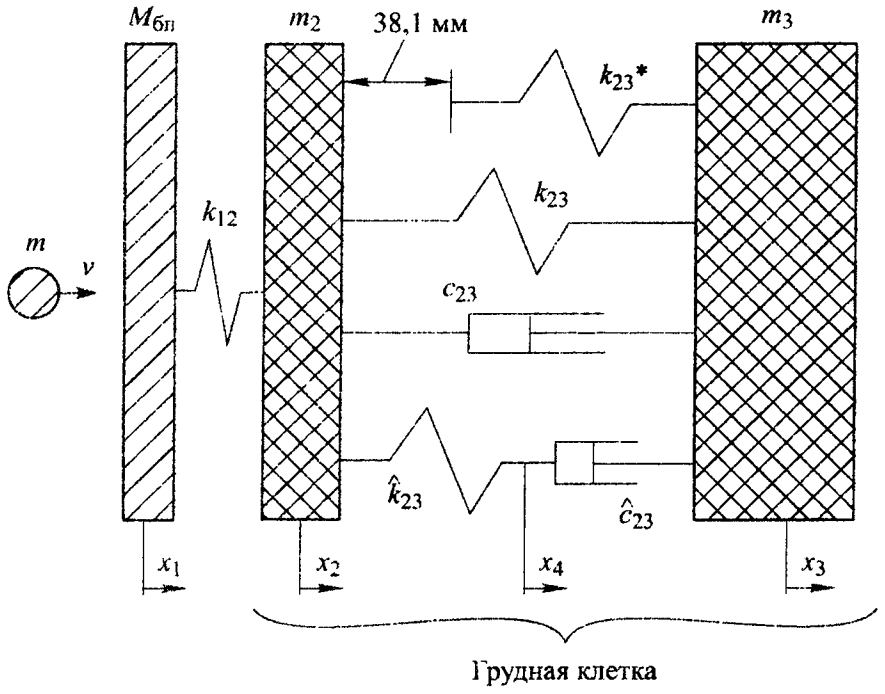


Рис. 10.3. Одномерная модель грудной клетки при ударе

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = k_{12}(x_1 - x_2) - k_{23}(x_2 - x_3) - \hat{k}_{23}(x_2 - x_4) - c_{23}\left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_3}{dt}\right),$$

$$m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} = k_{23}(x_2 - x_3) + \hat{c}_{23}\left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt}\right) + c_{23}\left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_3}{dt}\right),$$

$$\hat{c}_{23}\left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt}\right) = \hat{k}_{23}(x_2 - x_4).$$

Начальные условия:

$x_1(0) = x_2(0) = x_3(0) = x_4(0) = 0,$

$dx_1/dt = v_{бп}$, $dx_2/dt = dx_3/dt = dx_4/dt = 0.$

Параметры модели, взятые из [10.4], приведены в табл. 10.2.

Таблица 10.2

Параметры модели грудной клетки (модель Лобделла)

Параметр	Значение
k_{12}	281 кН/м
m_2	0,45 кг
l	3,81 см
k_{23}^{*}	52,6 кН/м
k_{23}	26,3 кН/м
$c_{23}\rightarrow$	0,52 кН·с/м
$c_{23}\leftarrow$	1,23 кН·с/м
$\hat{c}_{23}$	0,18 кН·с/м
$\hat{k}_{23}$	13,2 кН/м
m_3	37,2 кг

Модель хорошо описывает приведенные выше экспериментальные данные и вполне пригодна для оценки травмоопасности при ударе по грудной клетке бронепластин, разогнанных ударом пули. Результаты интегрирования приведенной выше системы дифференциальных уравнений с учетом зависимости упругих и вязких параметров модели от степени и направления деформации грудной клетки для частного случая приведены на рис. 10.4. Максимальное сжатие грудной клетки при $M_{бп}$ = 4 кг и $v_{бп}$ = 5 м/с составляет 21 мм, что при среднем размере грудной клетки в направлении позвоночника 250 мм соответствует деформации ε = 8,4%. Допустимой при низкоскоростном ударе считают деформацию до 20...25%. Максимальное сжатие грудной клетки достигается в течение первых 10 мс ударного взаимодействия.

2. Ударно-волновое нагружение объекта защиты осуществляется ударной волной или волной сжатия, которые формируются на начальной стадии ударного взаимодействия деформационного купола с прилегающими мягкими тканями объекта защиты. При отсутствии амортизирующей прокладки между бронезащитой и телом волна сжатия переходит из бронеэлемента в прилежащие ткани и органы. На рис. 10.5 приведены кадры фоторегистрации процесса взаимодействия пули калибром 7,62 мм с прозрачным желатиновым блоком, установленным за комбинированной керамикоорганo-

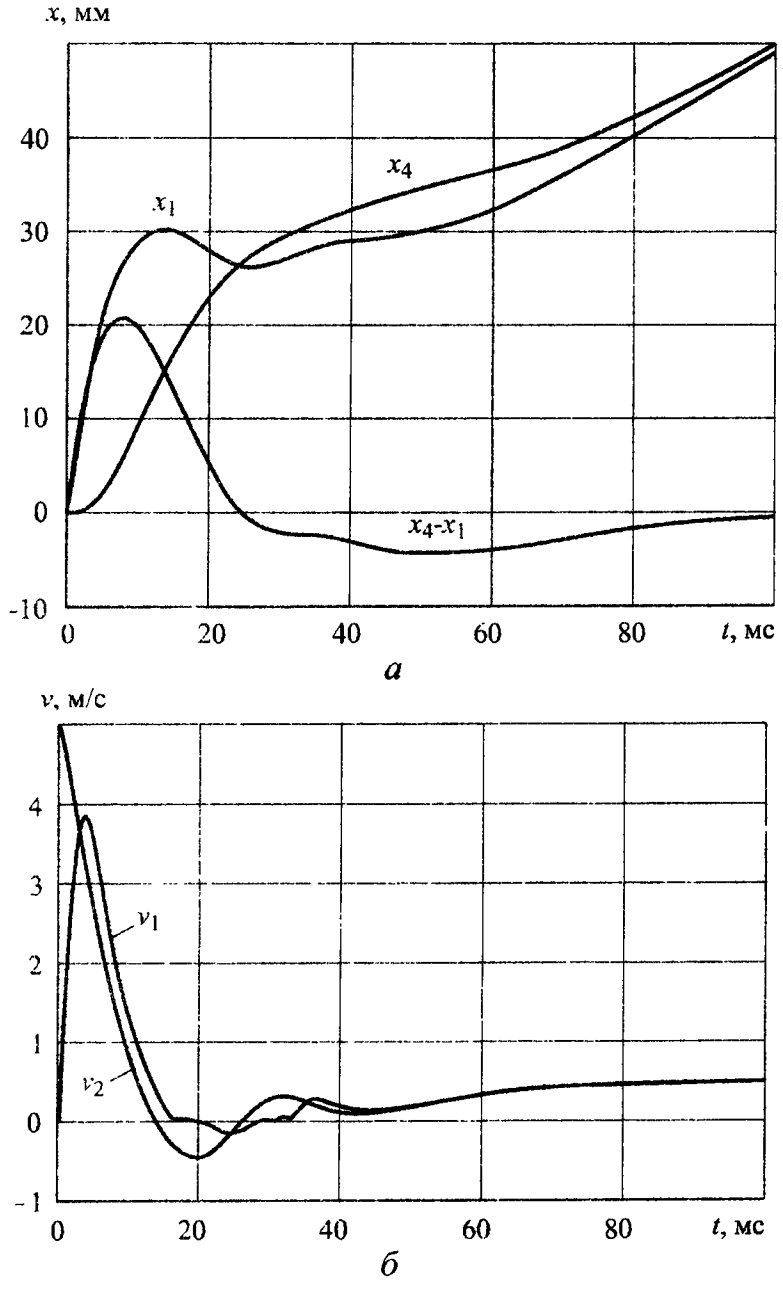


Рис. 10.4. Результаты численного анализа модели грудной клетки по Лобделлу применительно к удару бронепластиной массой 4 кг со скоростью 5 м/с: *а* – зависимости перемещения пластины x_1, позвоночной стенки x_4 и сжатия грудной клетки $x_1 - x_4$ от времени; *б* – зависимости скорости пластины v_1 и грудинного сегмента v_2 от времени

пластиковой преградой [10.4]. Скорость пули составляла 850 м/с. Давление в ударной волне, определенное по дисторсии прямоугольной сетки, составляло 10...15 МПа на расстоянии 5...8 см от границы раздела между преградой и желатиновым блоком.

При наличии легкой малоплотной амортизирующей прокладки волна сжатия в мягких тканях создается при ударе по ним деформационного купола. Роль амортизатора, по-видимому, состоит не только в ослаблении переходящего из бронеэлемента в прилегающие ткани ударно-волнового импульса, но и в том, чтобы обеспечить некоторый зазор Δ между тыльной поверхностью бронеэлемента и поверхностью защищаемого тела. Поскольку скорость деформационного купола быстро убывает с ростом его высоты (прогиба), то с увеличением толщины амортизирующей прокладки Δ уменьшается скорость локального удара купола по прилегающим мягким тканям и органам, что приводит к уменьшению амплитуды возникающей в них волны сжатия.

Ударная волна в мягких тканях создается ударом нижнего слоя бронеэлемента (чаще всего текстильного пакета или органопластика), движущегося со скоростью $v_1(\Delta)$. Для оценки возникающего начального давления p_1 можно воспользоваться соотношением, следующим из условия динамической совместности на границе раздела брони с мягкой тканью

$$p_1 = \frac{z_{бр} z_{мт}}{z_{бр} + z_{мт}} v_1(\Delta),$$

где $z_{бр} = \rho_{бр} c_{бр}$ и $z_{мт} = \rho_{мт} c_{мт}$ – акустические импедансы брони (бр) и мягкой ткани (мт), а $\rho_{бр}$, $\rho_{мт}$ и $c_{бр}$, $c_{мт}$ соответственно плотности и скорости звука во взаимодействующих материалах.

Скорость звука в сплошных мягких тканях хорошо известна. По данным ультразвуковых исследований в среднем она составляет $c_{мт}$ = 1540 м/с. Скорость звука в костной ткани существенно больше c = 3500 м/с. В противоположность этому скорость звука в пористой легочной ткани очень мала. По данным работы [10.5] она равна всего 40 м/с, а средняя плотность легочной ткани составляет 0,6 г/см^3.

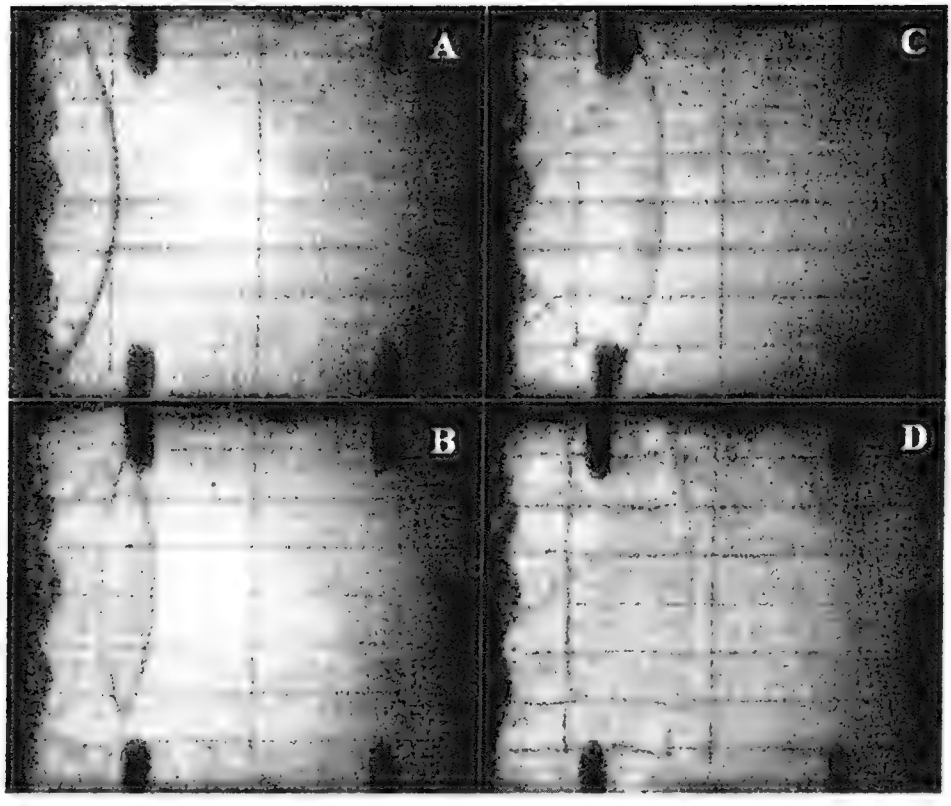


Рис. 10.5 Кадры фоторегистрации воздействия пули калибром 7,62 мм со скоростью 850 м/с на прозрачный желатиновый блок с размерами 8×8×15 см^3, закрытый со стороны воздействия комбинированной преградой из керамики и органопластика. Кадр А относится к времени 80 мкс после удара. Время между кадрами 7,5 мкс

Труднее обстоит дело со скоростью звука в текстильном бронепакете, поскольку удар по подстилающим мягким тканям наносится деформационным куполом, в котором текстильный материал уплотнен ударом пули. Для оценок примем $\rho_{бр}$ = 0,8 г/см^3, $c_{бр}$ = 500 м/с. Тогда начальная амплитуда волны сжатия в мягких тканях при v_1 = 10...100 м/с будет составлять p_1 = 3,2...32 МПа. При последующем распространении волны вследствие вовлечения в волновое движение все большей массы мягких тканей её амплитуда будет уменьшаться. Амплитуда полусферической акустической волны сжатия убывает обратно пропорционально ее радиусу r

$$p = p_1 \frac{r_0}{r},$$

где $r_0 \approx d_п$ – линейный масштаб ударного взаимодействия, равный диаметру пули. Приведенные в [10.1] экспериментальные данные примерно соответствуют этому закону при $r_0 = 9$ мм и $p_1 = 35$ МПа.

Второй пологий импульс давления (рис. 10.2) имеет, по-видимому, гидродинамическую природу и связан с торможением движения мягких тканей и органов при достижении максимальных размеров временной полости. Избыточное давление $p_т$, возникающее при торможении движущейся жидкости, может быть вычислено с помощью соотношения $p_т = \rho v^2/2$. При $\rho = 1000$ кг/м^3 и скорости жидкости $v = 10...40$ м/с давление торможения изменяется в пределах $p_т = 0{,}05...0{,}8$ МПа, что соответствует зарегистрированным в экспериментах давлениям. Возникающие при этом внутренние силы компенсируются упругостью и прочностью грудной клетки, а также инерционностью вовлеченных в движение органов.

До настоящего времени окончательно не установлены роли ударно-волнового и гидродинамического импульсов давления в развитии забронеевой контузионной травмы. Это очень сложная проблема, зависящая от места локализации ударного воздействия, типа бронезащиты, энергии удара и других факторов. Но, по-видимому, за патологические изменения в зоне сотрясения (коммоции) в большей степени отвечает ударно-волновой импульс давления, воздействие которого приводит к повреждениям капиллярной кровеносной системы и биологических тканей на клеточном уровне. В качестве критерия ударно-волнового поражения тканей и органов следует использовать критическое давление, определенное в специальных экспериментах с использованием образцов биологических тканей или желатиновых блоков с добавлением эритроцитарной массы (метод ЦНИИТО и Института проблем химической физики (Черноголовка)). Повреждающее действие ударной волны определяется по объему разрушения эритроцитов [10.1].

ЛИТЕРАТУРА

10.1. Концептуальные основы создания средств индивидуальной защиты. Часть I. Бронежилеты. Под общ. ред. В.Г. Михеева. М.: Межакадемическое изд. «Вооружение. Политика. Конверсия», 2003. – 340 с.

10.2. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. – В 2-х частях. Ч. 1. – М.: Гос. изд-во физ.–мат. лит., 1963.

10.3. Grimal Q., Naili S., Watzky A. A High-frequency Lung Injury Mechanism in Blunt Thoracic Impact // Journal of Biomechanics. – V. 38, p. 1247–1254, 2005.

10.4. Проблемы прочности в биомеханике / Под ред. И.Ф. Образцова. – М.: Высшая школа, 1988.

10.5. Herlaar K., Van Bree J.L., Smerenburg C. Optical Pressure Measurements in Behind Amour Blunt Trauma Experiments // Proceedings of the Twenty First International Symposium on Ballistics – Adelaide, Australia, 2004.

Глава 11. БАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ БРОНЕЗАЩИТЫ

11.1. Методы измерения скорости средств поражения

Баллистические испытания включают в себя испытания защитных бронеструктур средств индивидуальной защиты (СИБ), защиты бронетехники и других средств защиты на противопульную и противоосколочную стойкость. Цель испытаний состоит в проверке соответствия баллистической стойкости СИБ требованиям технических условий на испытываемое изделие, ГОСТов [11.1.-11.7.] или другой регламентирующей документации с соблюдением определенных правил, методик и программ испытаний. Испытания на противопульную стойкость СИБ производятся непосредственно обстрелом из стрелкового оружия. Для испытаний на противоосколочную стойкость используются специальные баллистические стволы, обеспечивающие метание с заданными скоростями имитаторов осколков.

Все испытания проводятся с измерением ударной скорости средства поражения в каждом выстреле и оценкой характера поражения. При этом в оценке защитных свойств учитываются только те результаты, которые соответствуют заданным требованиям. Так, если получен недопустимый уровень поражения (например, пробитие или поражение преграды со сквозными трещинами и т.д.) при скорости выше верхней границы заданного диапазона, то этот результат считается незачетным. Также незачетным считается удовлетворительный результат по поражению при скорости ниже нижней границы заданного диапазона. Однако неудовлетворительный результат по поражению при скорости ниже нижней границы заданного диапазона считается зачетным. Это связано со справедливым в большинстве случаев утверждением о том, что чем выше скорость ударника, тем выше вероятность поражения защиты и если получено поражение при меньшей скорости, то при большей скорости тем более будет поражение.

Поэтому надежность измерения скорости является важным условием проведения испытаний на баллистическую стойкость. Обычным требованием к точности измерения скорости является ограничение относительной погрешности измерений величиной 1%.

Существуют различные способы [11.8] измерения скорости движения тел. При проведении баллистических испытаний наиболее распространенным является относительно простой базовый способ измерения скорости, при котором определяется время прохождения телом базы – фиксированного расстояния между чувствительными элементами, которые обычно называют блокирующими устройствами или рамами-мишенями. Блокирующие устройства разделяют на контактные и неконтактные – оптические и индукционные. При использовании контактных рам-мишеней движущееся тело контактирует с элементами, находящимися под напряжением: слоями фольги, замыкая их, или с проволочками, разрывая их. При этом формируется электрический сигнал, регистрируемый соответствующей аппаратурой, позволяющей определять время между этими сигналами. При использовании неконтактных блокирующих устройств – оптических или индукционных датчиков, электрический сигнал формируется вследствие возмущений, вносимых в оптический или электромагнитный каналы пролетающим телом в момент пересечения им плоскости блокирующего устройства.

Учитывая ответственность испытаний и важность заключения о надежности средств индивидуальной защиты, обусловленную риском для жизни человека, вопросы оценки точности средств измерения скорости имеют большое значение. Казалось бы, задача аттестации средств измерения скорости не является сложной и может осуществляться инструментальными методами. Оценив погрешности определения базы измерений и времени, можно по известным соотношениям определить погрешность измерения скорости делением длины базы на время ее пролета. Однако более детальное рассмотрение процесса взаимодействия пули с чувствительными элементами средства измерения показывает, что существуют дополнительные источники погрешностей, которые затруднительно определить без проведения стрельбовых испытаний. При использовании контактных датчиков из 2-х слоев фольги, разделенных пленкой диэлектрика, измерение базы между запускающим и останавливающим датчиками не гарантирует неизменность ее

величины в динамических условиях в процессе взаимодействия пули с датчиком. Поскольку прежде чем произойдет замыкание датчика и выдача электрического сигнала на измеритель времени фольга деформируется, и величина деформации до момента замыкания зависит от скорости, формы и размера пули. При использовании проволочных датчиков, формирующих сигнал при разрыве проволочки, момент ее разрыва и формирование сигнала зависит от предельного удлинения, изменяющегося в зависимости от скорости и условий взаимодействия. При использовании неконтактных индукционных датчиков измерение базы в статических условиях практически невозможно, поскольку затруднительно определить плоскость, в которой формируется электрический сигнал, зависящий от величины скорости и массы движущегося тела. Не лучше обстоит дело и с оптическими датчиками. Если оптическая плоскость формируется набором дискретных лучей, то возникновение сигнала зависит от положения траектории пули относительно лучей. Различные условия взаимодействия пули с дискретными оптическими лучами схематично представлены на рис. 11.1.

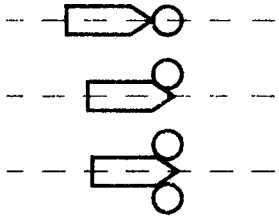


Рис. 11.1. Возможные случаи взаимодействия пули с дискретными оптическими лучами.

Если оптическая плоскость формируется линейным зеркалом от одного источника света, то сигнал на измеритель времени, определяемый интенсивностью тени от пули, также зависит от ее скорости и геометрических размеров. Таким образом, в статических условиях без проведения стрельбовых испытаний учесть все факторы, влияющие на точность определения скорости, не представляется возможным.

Известен способ оценки точности средств измерений скорости стрельбой так называемыми образцовыми патронами, которые изготовляются с минимально возможными технологическими отклонениями. При этом предполагается, что среднее значение скорости

10 выстрелов такими патронами можно использовать в качестве оценки погрешности средства измерения. Хотя такой способ до недавнего времени использовался на практике, его вряд ли можно считать приемлемым, поскольку, несмотря на повышенную точность изготовления, разброс скоростей самих образцовых патронов достигает значений 3...5%.

В практике проведения испытаний в Российском центре испытаний средств индивидуальной защиты НИИ стали, располагающим измерителями скорости с индукционными, оптическими лучевыми и непрерывными датчиками, контактными рамами–мишенями различных схем, накоплен большой опыт по их применению при проведении оценочных и сертификационных испытаний различных средств защиты.

Для оценки пригодности новых измерителей скорости используется сравнительный метод оценки измерителей скорости для проведения пулевых испытаний. Сущность его заключается в том, что в одном опыте скорость пули измеряется различными измерителями, основанными на различных физических принципах (оптических, индукционных, контактных). Сопоставляя результаты различных измерителей, можно сделать вывод об их относительной точности. Фотографии некоторых измерителей скорости представлены на рис. 11.2-11.6.

При использовании оптических измерителей скорости ФЭБ-7 (база измерения 2000 мм, погрешность измерений не более 0,5%) и РС-4М (база измерения 400 мм, погрешность измерений не более 1,0%) их геометрические размеры позволяют совместить середины баз измерений в одной плоскости рис. 11.7.

В этом случае сравнение результатов двух измерителей можно проводить непосредственно. Если средние плоскости баз измерений невозможно совместить, в частности, когда один из датчиков расположен вблизи дульного среза, а другой на некотором удалении (рис.11.8), необходимо учитывать падение скорости пули на траектории, которое можно определить для конкретного средства испытания по таблицам стрельбы [11.9-11.12].

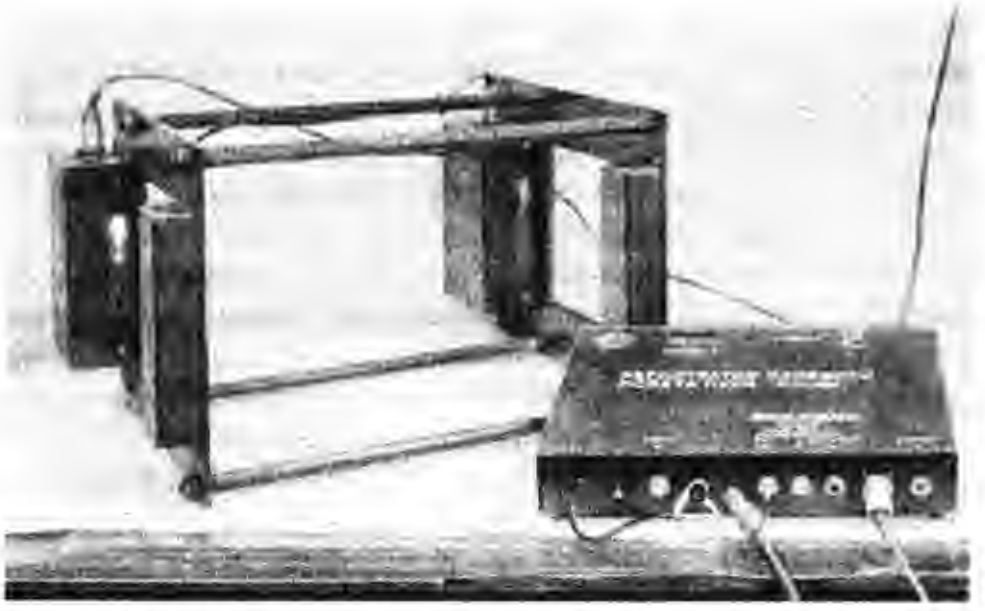


Рис. 11.2. Измеритель скорости РС-4М (оптический).

Рис. 11.3. Измеритель скорости ФЕБ -7 (оптический).

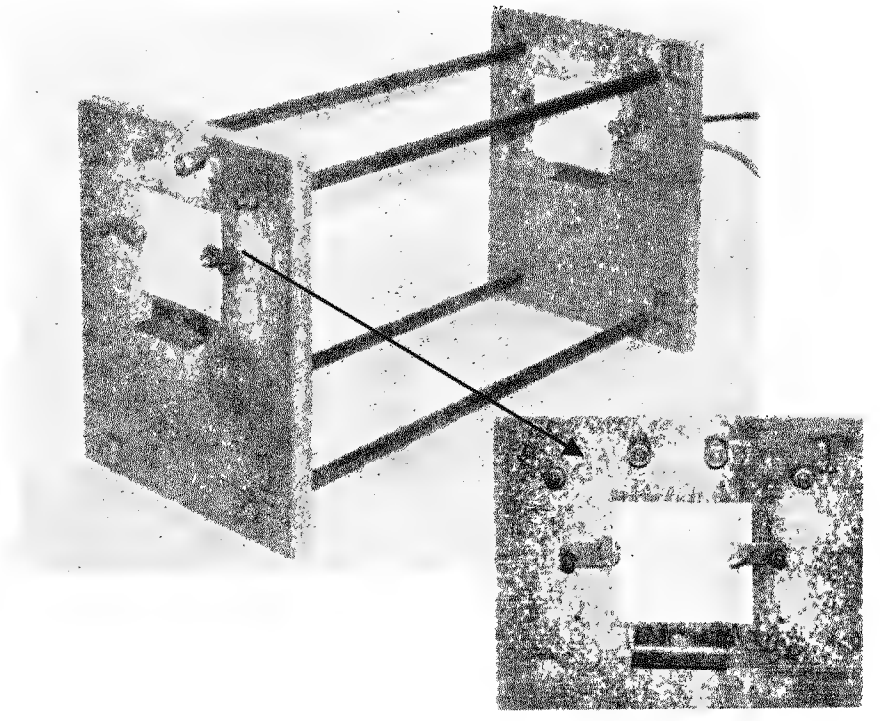


Рис. 11.4. Рамы-мишени с датчиками контактного типа.

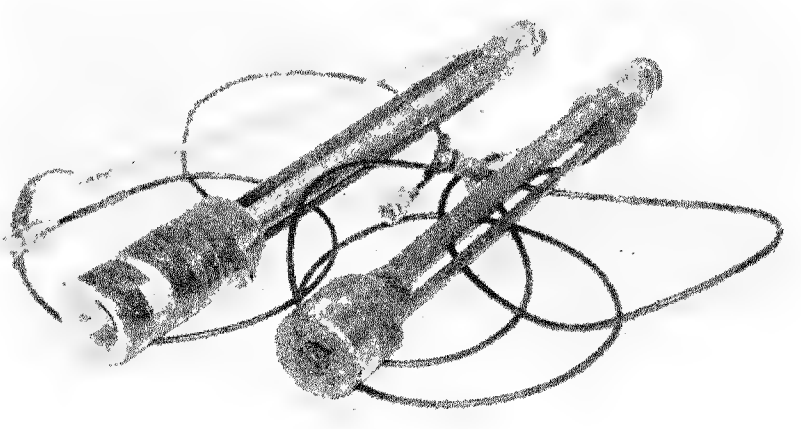


Рис. 11.5. Индукционный измеритель скорости БИС-2

Рис. 11.6. Автономный индукционный измеритель скорости

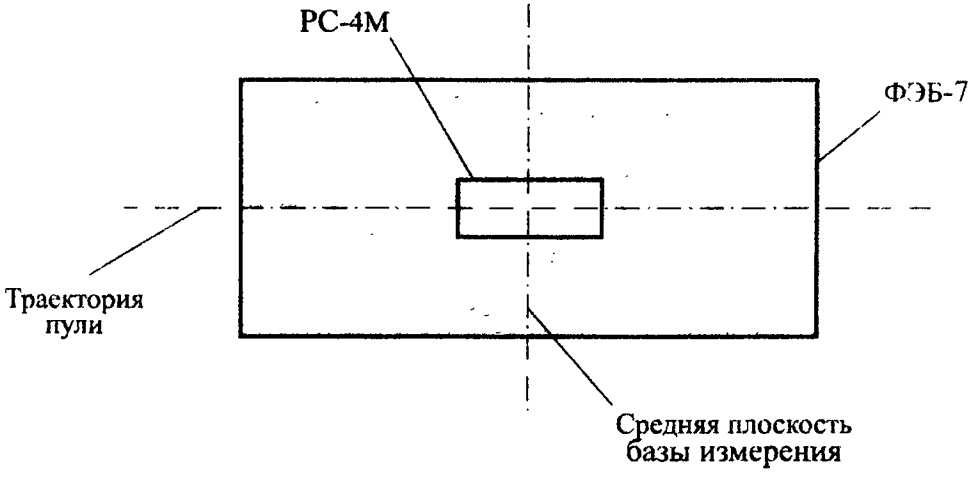


Рис. 11.7. Расположение двух измерителей скорости с совмещением средней плоскости их баз измерений.

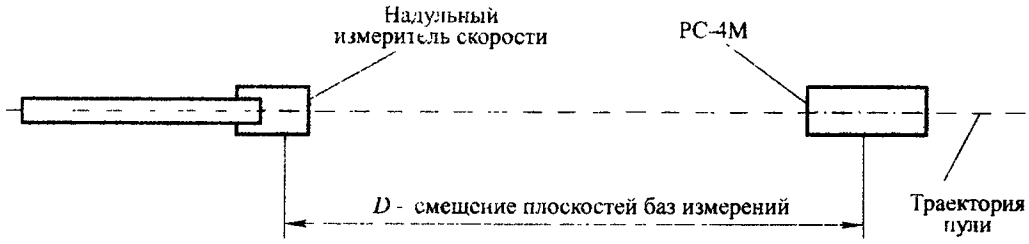


Рис. 11.8. Расположение двух измерителей скорости с расхождением средних плоскостей их баз измерений.

Распространенным на практике является определение средней скорости на расстоянии 25 м (v_{25}) от дульного среза оружия методом измерения времени t_{50} пролета пули дистанции 50 метров $v_{25} = 50/t_{50}$. При этом датчик, запускающий измеритель времени находится на дульном срезе оружия, а останавливающий - на расстоянии 50 м. При таком способе определения неизбежны погрешности, связанные с тем, что падение скорости на траектории не является линейным. Проведем анализ погрешностей определения средней скорости на некоторой дистанции S относительно мгновенной скорости на расстоянии $S/2$. В табл. 11.1 приведены значения скорости v_S, времени полета t_S на различные расстояния S от дульного среза оружия и рассчитанная по этим значениям средняя скорость $v_{S/2}$, которая приписывается середине соответствующей дистанции для пули ЛПС калибра 7,62 мм (винтовка СВД) [11.9].

Таблица 11.1

Анализ погрешностей определения средней скорости пули ЛПС калибра 7,62 мм (винтовка СВД).

Дистанция S, м	Скорость v_S, м/с	Время полета t_S, с	Средняя скорость $v_{S/2}$, м/с	Погрешность, %
1	826,6	0,001	826,6	0,00
5	825,2	0,006	825,0	–0,02
10	823,3	0,012	823,2	–0,02
15	821,5	0,018	821,3	–0,02
20	819,7	0,024	819,5	–0,02
25	817,9	0,030	817,7	–0,02
30	816,1	0,037	815,9	–0,02
35	814,3	0,043	814,0	–0,03

Окончание табл. 11.1

Дистанция S, м	Скорость v_S, м/с	Время полета t_S, с	Средняя скорость $v_{S/2}$, м/с	Погрешность, %
40	812,5	0,049	812,2	–0,03
45	810,7	0,055	810,4	–0,03
50	808,9	0,061	808,6	–0,03
60	805,3	0,074	804,9	–0,04
70	801,7	0,086	801,3	–0,05
80	798,1	0,098	797,6	–0,05
90	794,5	0,111	794,0	–0,06
100	790,9	0,124	790,3	–0,07
200	755,7	0,253	754,0	–0,23
300	721,3	0,389	717,7	–0,50
400	687,9	0,531	681,6	–0,92
500	655,3	0,680	645,5	–1,49

Изменение погрешности измерения наглядно иллюстрируется диаграммой, приведенной на рис. 11.9.

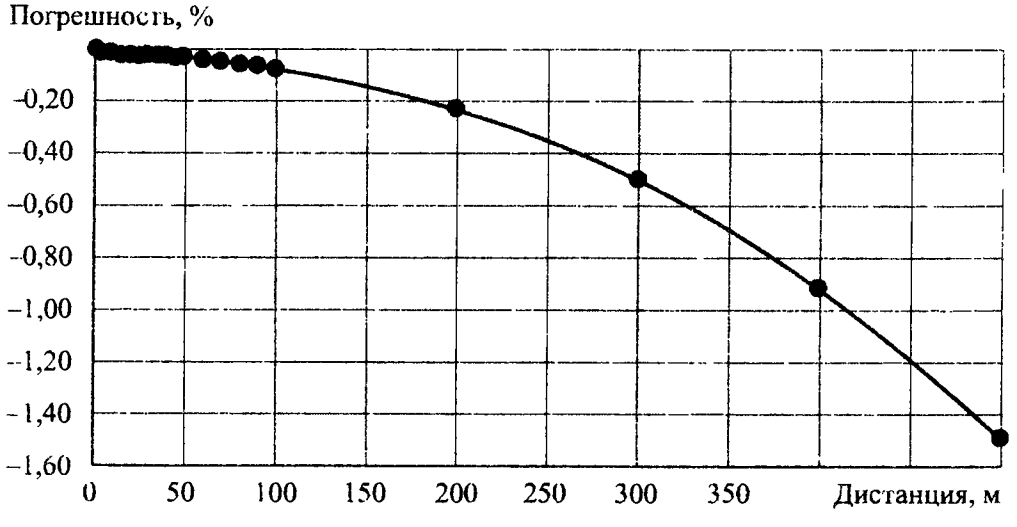


Рис. 11.9. Погрешность определения средней скорости на некоторой дистанции S относительно мгновенной скорости на расстоянии $S/2$

Приведенные результаты показывают, что погрешность определения средней скорости на половине дистанции стрельбы относительно мгновенной скорости на том же расстоянии возрастает с

увеличением дистанции, однако на дистанциях до 300 м погрешность незначительна и не превышает 0,5 %.

В основном испытания средств индивидуальной защиты на пулестойкость производятся стрельбой из боевого стрелкового оружия или соответствующих баллистических стволов стрельбой с 5...10 м или с дистанции, заданной в технических условиях на изделие. На конкретные образцы защиты бронетехники, средств индивидуальной защиты и другие средства защиты зачастую задаются требования обеспечения противопульной стойкости при стрельбе с заданной дистанции, которая может составлять, например 50 м, 100 м, 300м и более. Ударная скорость на таких дистанциях существенно меньше начальной скорости пули. Обеспечить требуемую точность попадания при стрельбе с больших дистанций значительно сложнее, чем при стрельбе с дистанций 5...10 м, а также значительно сложнее обеспечить измерение ударной скорости в каждом выстреле. Поэтому возникает необходимость стрельбы с коротких дистанций с обеспечением аналогичных условий действия пули по оцениваемой защите. Результат взаимодействия средства поражения с защитой определяется, прежде всего, ударной скоростью. Поэтому можно проводить испытания при стрельбе с дистанций 5...10 м с обеспечением заданной ударной скорости за счет изменения массы порохового заряда используемого патрона. Такие испытания называются испытаниями в приведенных условиях. Порядок работ по обеспечению испытаний в приведенных условиях заключается в следующем:

– если задана дистанция стрельбы, то по таблицам стрельбы для конкретного патрона [11.9-11.10] определяется скорость на этой дистанции. Если задана скорость, при которой должны проводиться испытания, то ее значение и используется в дальнейшей работе. Распределение скорости по дистанции стрельбы для некоторых типов патронов приведены в прил. 4 на рис. П4.4- П4.17;

– по величине скорости расчетным путем определяется масса пороховой навески, при которой будет обеспечиваться заданное значение скорости. При относительно небольшом изменении скорости относительно штатных условий для оценки массы пороховой навески можно воспользоваться формулой:

$$M_x = M_{\text{штатн}} \cdot v_{\text{заданная}} / v_{\text{штатн}}$$

где: M_x – искомая масса пороховой навески; $v_{штатн}$ и $M_{штатн}$ — скорость пули и масса пороховой навески в штатных условиях; $v_{заданная}$ – заданная скорость пули.

Зависимости дульной скорости пули от массы пороховой навески при испытаниях с приведенными скоростями для некоторых типов оружия и патронов приведены в прил. 4 на рис. П4.1-П4.3.

Приведенные экспериментальные данные получены при стандартных условиях испытаний (температура, давление, относительная влажность) и однотипных условиях снаряжения патрона.

Еще одним вопросом, непосредственно относящимся к измерению скорости средства поражения, является место расположения измерителя скорости относительно объекта испытаний. Естественно, чем меньше расстояние от середины базы измерений до объекта испытаний, тем меньше расхождение измеренного значения скорости и скорости в момент соударения, т.е. ударной скорости. Значение ударной скорости по измеренной можно рассчитать по формуле:

$$v_{уд} = v_{изм} \cdot e^{-\frac{i_{43} c_x \rho_в S_м D}{2m}}$$

где: $v_{изм}$ – измеренная скорость; i_{43} – коэффициент формы пули по закону 1943 г.; c_x– функция лобового сопротивления по закону 1943 г.; $\rho_в$ = 1,226 кг/м^3– плотность воздуха при температуре 15 °С и давлении 760 мм рт. ст.; $S_м$ – площадь миделя пули, м^2; m – масса пули, кг; D – расстояние от центра базы измерения до мишени.

На практике при пулевых испытаниях за ударную скорость принимают ее значение, измеренное на расстоянии не более 3-х метров от лицевой поверхности объекта испытаний. Бытует легко запоминаемое крылатое выражение «метр на метре», которое означает, что для пуль, за счет торможения в воздухе, характерным значением падения скорости на пути в 1 м является 1 м/с. На рис. 11.10 приведены расчетные данные по изменению величины падения скорости пули Δv на расстоянии 1 м в зависимости о величины скорости для различных типов оружия.

Как следует из приведенных данных в диапазоне рабочих скоростей (для длинноствольного оружия – автоматов и винтовок 700...800 м/с, для короткоствольного оружия – пистолетов и револьверов 300...400 м/с) величина падения скорости пули на рас-

стоянии 1 м находится на уровне порядка 1 м/с (от 0,3 м/с до 1,4 м/с). При меньших скоростях величина падения скорости пули на расстоянии 1 м, соответственно, еще меньше. Откуда следует, что при измерении скорости пуль на расстоянии не более 3 м от мишени, погрешность в определении ударной скорости не будет превышать 1%, что находится в пределах экспериментальной ошибки определения величины самой скорости.

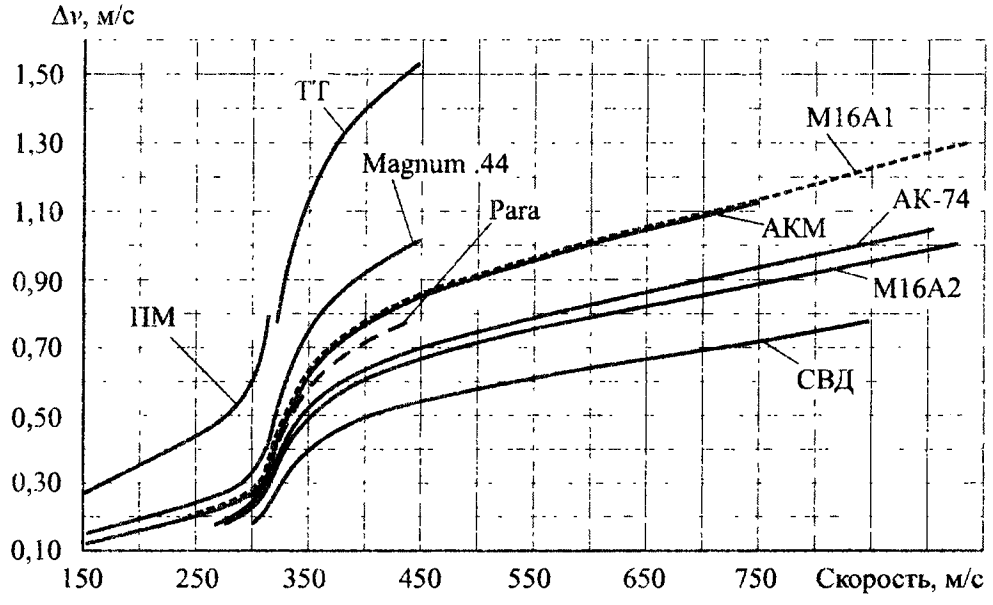


Рис. 11.10. Изменение величины падения скорости пули на расстоянии 1 м в зависимости о величины скорости для: 7,62-мм винтовки СВД, 5,45-мм автомата АК-74, 7,62-мм автомата АКМ, 5,56-мм винтовки M16A1, 5,56-мм винтовки M16A2, 9,0-мм патрона Parabellum, 9,0-мм пистолета ПМ, 7,62-мм пистолета ТТ, 11,43-мм патрона Magnum .44

Иначе обстоит дело с определением ударной скорости имитаторов осколка, в качестве которого в отечественной практике принимается стальной шарик массой 1 г, в США [11.13] цилиндр со скошенными краями примерно такой же массы, аэродинамическое совершенство формы которых существенно уступает форме пули.

В работе [11.14] были проведены экспериментальные исследования с измерением в одном опыте скорости движения стального шарика диаметром 6,35 мм двумя измерителями, смещенными один относительно другого на некоторое расстояние, позволяющие определить падение скорости на 1 м пути в зависимости от величи-

ны скорости. Результаты экспериментальных исследований представлены на диаграмме (рис. 11.11).

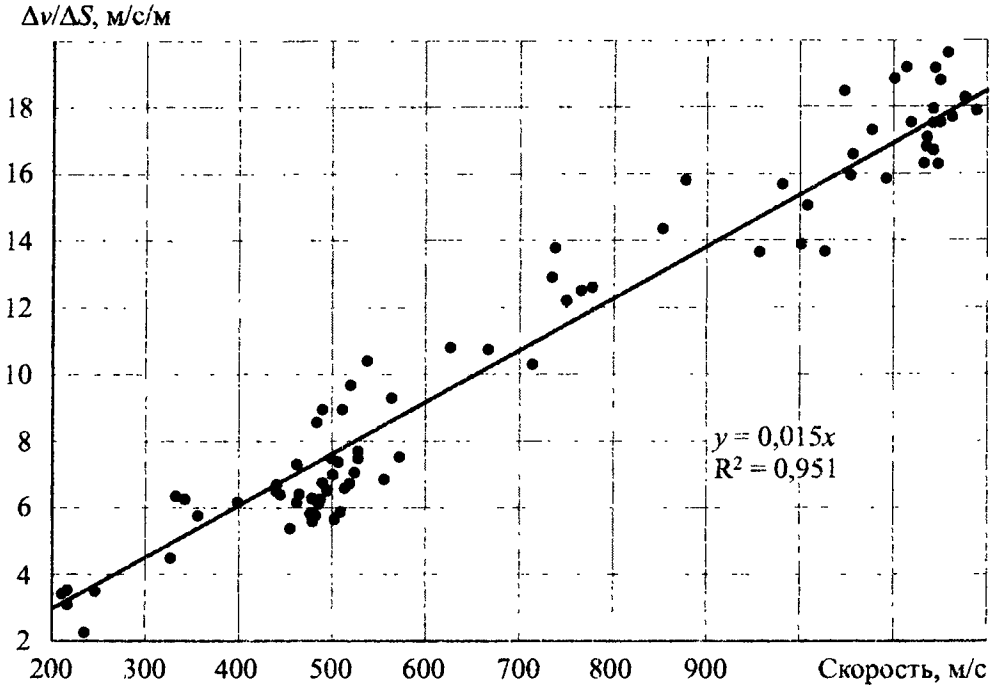


Рис. 11.11. Изменение величины падения скорости на пути в 1 м стального шарика диаметром 6,35 мм в зависимости от величины скорости. $y = 0{,}015x$ – уравнение регрессионной кривой:, R – коэффициент корреляции.

Следует еще раз подчеркнуть, что падение скорости для стального шарика массой 1 г. на порядок выше, чем для пуль, и, например, при скоростях 650...800 м/с – составляют 10...12 м/с на 1 м пути.

Обработкой экспериментальных данных по способу наименьших квадратов был определен коэффициент (B) пропорциональности в уравнении, связывающем значение скорости с величиной падения скорости на пути 1 м.

$B = 0{,}015$ [1/м].

Правомерность использования линейного вида уравнения в диапазоне скоростей 200...1200 м/с подтверждается достаточно высоким значением коэффициента корреляции, составляющим 0,95. Тогда можно записать:

$$\frac{dv}{dS} = -B \cdot v, \quad \frac{dv}{dS} = -0{,}015 \cdot v \qquad (11.1)$$

Проинтегрировав уравнение (11.1) при начальных условиях S=0, v=v_0, получим уравнение (11.2) для определения скорости шарика на траектории:

$$v_S = v_0 \cdot e^{-0.015 \cdot S} \qquad (11.2)$$

Приведенная зависимость позволяет рассчитать скорость на любом расстоянии относительно базы измерений.

Для практического использования полученных результатов при проведении экспериментов, в которых варьируется скорость, пользоваться расчетными данными неудобно. Можно предложить достаточно простой способ приведения скорости, измеренной на некотором расстоянии от мишени к ударной скорости.

При относительно небольших расстояниях S (до 5...10 м) от места измерения скорости до мишени можно принять падение скорости на единицу проходимого расстояния пропорциональным не текущей, а измеренной скорости, тогда величина Δv падения скорости на расстоянии S определяется соотношением (11.3):

$$\Delta v = B \cdot v_s \cdot S. \qquad (11.3)$$

где v_s –скорость, измеренная на расстоянии S от мишени.

С учетом падения скорости ударная скорость будет определяться зависимостью (11.4):

$$v_{уд} = v_s - \Delta v = v_s - B \cdot v_s \cdot S = v_s \cdot (1 - B \cdot S). \qquad (11.4)$$

Следствием, вытекающим из зависимости (11.4), является существенный для практики вывод о том, что при постоянном расположении измерителя скорости относительно мишени (S = const) ударная скорость отличается от измеренной на постоянный сомножитель $Z = (1 - B \cdot S)$. Тогда, в случае проведения испытаний шариком, для определения ударной скорости достаточно ввести поправочный коэффициент к базе измерений (если регистрируется время пролета) или к величине самой скорости (если она определяется непосредственно). Причем значение этого коэффициента не зависит от величины скорости, при которой проводятся испытания, а определяется только расстоянием.

Величина погрешности определения ударной скорости, вызванная принятым выше допущением, зависит только от расстоя-

ния от места измерения скорости до мишени S, что иллюстрируется диаграммой, представленной на рис. 11.12.

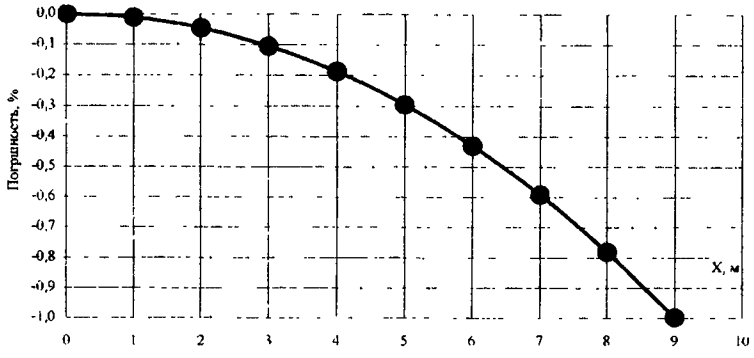


Рис. 11.12. Погрешность определения ударной скорости в зависимости от расстояния до мишени.

На расстояниях до 5 м погрешность приближенного определения ударной скорости не превышает 0,3 % от ее истинного значения, а на расстояниях до 9 м погрешность не более 1 %.

Если регистрируется не время пролета определенной базы, а непосредственно скорость, то коэффициент Z вводится как поправка к измеренному значению скорости: $v_{\text{ударн}} = v \cdot Z$

11.2. Экспериментальные методы определения показателей действия средств поражения и характеристик защиты

Процесс взаимодействия с элементами защиты таких средств поражения, как пули стрелкового оружия или осколки, формируемые осколочно-фугасными боеприпасами, подвержен влиянию многочисленных факторов, имеющих случайный характер. Например, условия подхода пули к защите характеризуются не только скоростью поступательного движения, которая составляет сотни метров в секунду, но и характеристиками прецессионно–нутационного движения пули, которые в начальный момент взаимодействия могут считаться случайными. Поэтому даже для конкретной пары пуля–преграда результат взаимодействия имеет вероятностный характер, а баллистическая стойкость защиты характеризуется статистическим распределением вероятности непроби-

тия в зависимости от скорости пули или других характеристик взаимодействия.

Баллистическая стойкость защиты определяется, как правило, экспериментально путем ее обстрела пулями или имитаторами осколков. Характеристиками баллистической стойкости защиты, используемыми на практике, являются:

– предел кондиционного поражения по скорости $v_{пкп}$ – значение скорости поражающего элемента, ниже которой обеспечивается надежное (практически 100 %) непробитие защиты. Эта характеристика в основном распространяется на случаи взаимодействия средства поражения по нормали к поверхности преграды и используется преимущественно разработчиками защиты;

– предел сквозного пробития по скорости $v_{псп}$ – значение скорости поражающего элемента, выше которой обеспечивается надежное (практически 100 %) пробитие защиты, эта характеристика также в основном распространяется на случаи взаимодействия средства поражения по нормали к поверхности преграды и преимущественно используется разработчиками средств поражения;

– баллистический предел v_{50}, характеризующийся значением скорости поражающего элемента, при которой вероятность пробития, а также и непробития защиты составляет 50 %. Эта наиболее надежно определяемая характеристика достаточно широко используется [11.15-11.20.] при оценке качества защитных материалов, входном контроле бронематериалов;

– предел кондиционного поражения по углу $\alpha_{пкп}$ – значение угла взаимодействия поражающего элемента с преградой, отсчитываемого от нормали к поверхности преграды, при превышении которого обеспечивается надежное (практически 100 %) непробитие защиты. Существование этой характеристики связано с тем, что изменение конструктивного угла защиты бронемашины или другого объекта бронетехники является одним из способов повышения его защищенности.

Следует отметить, что перечисленные выше характеристики баллистической стойкости предполагают монотонный характер изменения вероятности пробития защиты от скорости удара и угла взаимодействия. Чем выше скорость удара, тем больше вероятность пробития преграды при прочих равных условиях. И, соответ-

ственно, чем меньше угол взаимодействия от нормали к преграде, тем больше вероятность пробития.

Учитывая относительно высокую стоимость испытаний, актуальной задачей является разработка более информативных методов исследования, позволяющих целенаправленно искать оптимальные защитные структуры при минимальных затратах времени и средств.

Рассмотрим технологию определения пределов пробития и непробития на примере определения предела кондиционного поражения по скорости $v_{пкп}$. При проведении испытаний производят выстрелы из конкретного оружия по заданной защите с варьированием скорости, обычно с шагом 20 м/с, добиваясь при этом, чтобы в интервале скоростей 20 м/с находились результаты с пробитием и непробитием защиты. Результаты типичной серии опытов по определению предела кондиционного поражения по скорости представлены в табл. 11.2 и на рис. 11.13.

Таблица 11.2

Результаты опытов по определению баллистической стойкости защитной структуры при обстреле стальными шариками массой 1,03 г

№ опыта	Скорость, м/с	Результат	№ опыта	Скорость, м/с	Результат
1	546	Пробитие	10	527	Непробитие
2	542	Пробитие	11	523	Непробитие
3	540	Непробитие	12	522	Непробитие
4	537	Пробитие	13	508	Непробитие
5	535	Пробитие	14	508	Непробитие
6	534	Непробитие	15	510	Непробитие
7	531	Непробитие	16	517	Непробитие
8	530	Пробитие	17	511	Непробитие
9	528	Непробитие			

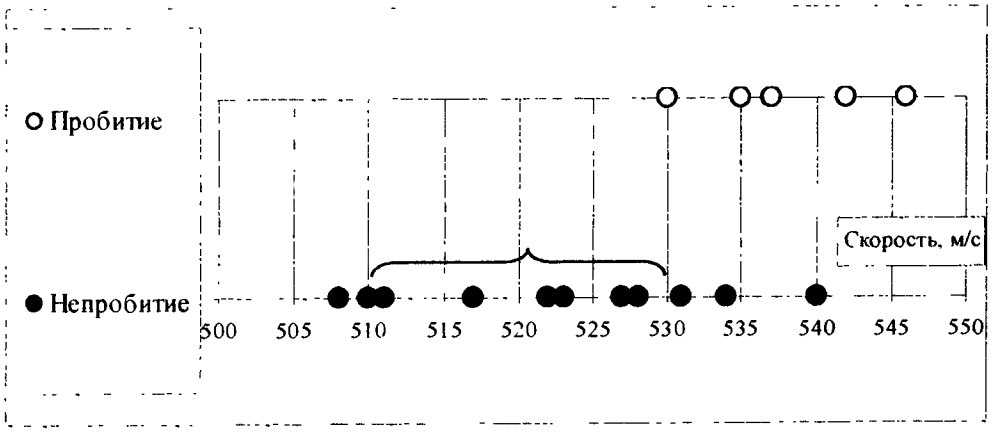


Рис. 11.13. Диаграмма серии опытов по определению предела кондиционного поражения $v_{пкп}$.

Далее находится минимальная скорость пробития, в данном случае она составляет 530 м/с, и рассчитывается среднее арифметическое значение скоростей (с результатом непробитие) в интервале скоростей, отмеченным на диаграмме фигурной стрелкой, от минимальной скорости непробития до значения скорости, меньшего на 20 м/с, т.е. 510 м/с. Для достаточно надежного определения искомой характеристики в этом интервале должно быть не менее 5-7 результатов. Это и есть искомое значение предела кондиционного поражения по скорости $v_{пкп}$.

$$v_{пкп} = \frac{528 + 527 + 523 + 522 + 510 + 517 + 511}{7} = 519{,}7 \text{ м/с}$$

Недостатками такого способа определения предела кондиционного поражения являются:

1. В качестве базовой точки для определения $v_{пкп}$ используется случайный результат – минимальная скорость пробития, вероятность появления которого близка к нулю.

2. При определении $v_{пкп}$ используется не вся информация, полученная при проведении опытов, а только результаты 5-7 опытов, т.е. менее половины информации.

3. Усреднение результатов опытов, проведенных в указанном интервале скоростей [$v_{мин\ проб}$...($v_{мин\ проб}$ -20 м/с)], может приводить к изменению $v_{пкп}$ в пределах до 20 м/с в зависимости от конкретно полученных значений скоростей в заданном интервале.

4. Получение непробития в ряде зачетных опытов не означает 100% вероятности непробития, а позволяет лишь утверждать, что верхняя граница вероятности непробития не превышает 0,72 при доверительной вероятности 0,9 для 7 опытов, или 0,63 для 5 опытов. При этом определить, какой вероятности непробития соответствует найденное значение скорости $v_{пкп}$ не представляется возможным.

5. Не определяется другой, не менее важный предел – предел сквозного пробития $v_{псп}$. Следует отметить, что интервал от $v_{пкп}$ до $v_{псп}$ для большинства защитных структур составляет 20...80 м/с.

Для нахождения предела сквозного пробития по скорости $v_{псп}$, применительно к рассматриваемым выше экспериментальным результатам, следовало бы продолжить испытания в диапазоне скоростей на 20 м/с выше максимальной скорости непробития (от 540 до 560 м/с) и если в этом диапазоне удастся получить не менее 5-7 результатов пробития, то их среднее арифметическое значение и будет искомым значением $v_{псп}$. Если же при скорости большей, чем 540 м/с, будет получено еще непробитие, тогда следует продолжить испытания от этого нового значения максимальной скорости непробития по описанной выше схеме.

Аналогичным способом определяется значение пределов кондиционного и некондиционного поражения по углу. При этом шаг по углу принимается равным 2°, а скорость взаимодействия должна быть относительно постоянной, т.е. находиться в пределе ±10 м/с от заданного значения.

Наиболее достоверной характеристикой баллистической стойкости защиты, определяемой по получаемым в баллистических экспериментах данным, является баллистический предел v_{50}, который достаточно широко используется в процессе производства средств защиты как критерий качества изготовления продукции и служит нормой для ее приемки или браковки. В частности, в военных стандартах США [11.17.] для броневой стали и для алюминиевых бронесплавов 5083 и 5456 баллистический предел v_{50} служит характеристикой для приемки партий стальной брони и броневого алюминия для изготовления боевых машин, что иллюстрируется диаграммой, приведенной на рис.11.14.

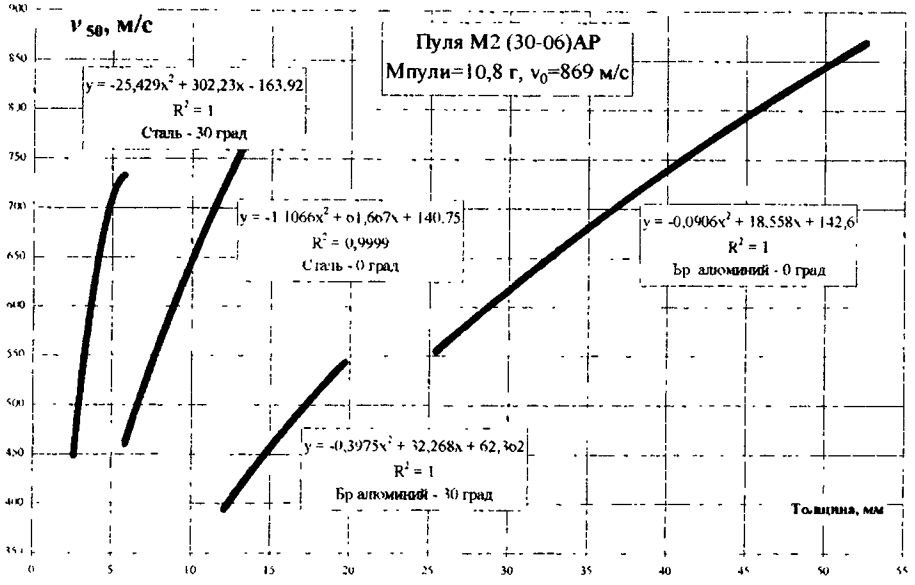


Рис. 11.14. Зависимость v_{50} от толщины преграды для стальной и алюминиевой брони при углах взаимодействия 0 и 30 градусов от нормали.

Столь большое значение характеристики v_{50}, влияющей на процесс производства бронематериалов, а также на риски производителя и заказчика обусловливает необходимость совершенствования методик ее определения. Кроме того, качество методического обеспечения, определяющего точность оценки фактического уровня защитных характеристик, вносит свой вклад в развитие и оптимизацию конструктивных параметров элементов защиты. Повышение точности и надежности определения уровня фактической стойкости защиты, позволяет оптимизировать толщину защиты, устранить необоснованный ее запас, минимизировать массу образца, что, в конечном счете, определяет техническое совершенство средства защиты в целом.

В настоящее время к защитным структурам с минимально возможной массой зачастую предъявляется требование обеспечения 100%-ого непробития при воздействии определенного средства поражения. При оценке качества конкретной защиты, например при приемке продукции, предназначенной для обеспечения противопульной защиты, производятся испытания на подтверждение заданных требований. Как правило, производится пять выстрелов, и

если защита выдержала эти испытания, то есть не было получено ни одного пробития, то партия продукции считается принятой для дальнейшей эксплуатации. С позиций теории вероятности и математической статистики [11.21-11.23] надежность защиты можно оценить, задавшись уровнем доверительной вероятности, и, в зависимости от числа опытов и числа пробитий, найти нижнюю границу вероятности обеспечения защиты, которая и характеризует надежность защиты. Результаты такой оценки иллюстрируются данными табл. 11.3. и рис. 11.15.

Таблица 11.3.

Статистические характеристики надежности защиты

Число оптов	Число пробитий	Доверительная вероятность	Надежность защиты
5	0	0,8	0,725
10			0,85
15			0,898
20			0,923
5	0	0,9	0,631
10			0,794
15			0,858
20			0,891
5	1	0,8	0,6
10			0,8
15			0,867
20			0,9
5	1	0,9	0,4
10			0,7
15			0,8
20			0,85

Прокомментировать представленные результаты можно следующим образом. Для определения надежности защиты необходим достаточно большой объем испытаний. Даже отсутствие пробития при небольшом числе опытов не гарантирует 100%-ой надежности защиты. Так, при отсутствии пробитий в испытаниях из пяти опы-

тов надежность защиты составляет 0,725, а в случае одного пробития из десяти опытов надежность защиты составляет 0,8.

Характеристика v_{50} по определению является статистической и для ее нахождения необходимо проведение достаточно большого числа опытов. Важной задачей является определение условий, обеспечивающих сокращение объема испытаний без снижения надежности получаемого результата.

Общепринятая методика экспериментального определения v_{50} заключается в проведении серии баллистических испытаний в объеме не менее 20 опытов с изменением скорости поражающего по схеме «вверх-вниз», т.е. уменьшении скорости поражающего элемента в следующем опыте после получения пробития защиты, или увеличении скорости поражающего элемента после ее непробития. На основе практического опыта, накопленного в Российском Центре испытаний средств индивидуальной защиты НИИ стали, можно рекомендовать следующую методику проведения испытаний по определению v_{50}, позволяющую сократить объем испытаний.

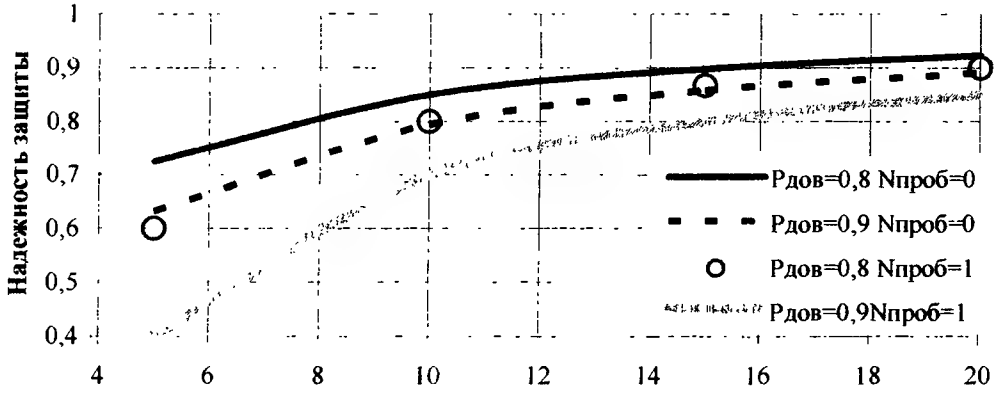


Рис. 11.15. Надежность защиты в зависимости от числа опытов при различных количествах пробитий.

Испытания проводятся, начиная с заданной в технических требованиях скорости, с изменением скорости поражающего элемента по схеме «вверх-вниз», при этом в процессе испытаний должны быть определены:

– $v_{max\ непр}$, максимальная скорость непробития защиты, скорость при которой еще не наблюдается пробитие, а выше которой наблюдаются только случаи пробития;

– $v_{min\ проб}$ – минимальная скорость пробития защиты, т.е. скорость, ниже которой не наблюдались случаи пробития защиты.

При этом, возможны 2 случая:

1) $v_{min\ проб} < v_{max\ непр}$, т.е. имеется зона смешанных результатов – диапазон скоростей, в котором наблюдается как пробитие, так и непробитие защиты. Этот случай характерен для большинства тканевых и металлических материалов, причем ширина зоны ($B_з = v_{max\ непр} - v_{min\ проб}$) достигает значений несколько десятков и даже сотен метров в секунду.

2) $v_{min\ проб} > v_{max\ непр}$, т.е. зона смешанных результатов отсутствует, т.е. граница между областями пробития и непробития защиты резкая. В практике испытаний защиты минимальной массы такой случай встречается относительно редко.

В процессе испытаний скорость может изменяться в широких пределах, поэтому представляется важным определение зачетного диапазона скоростей, поскольку непробитие защиты при очень малой скорости, а также пробитие защиты при очень большой скорости очевидны и не несут значимой информации. Наиболее информативными являются результаты, полученные в диапазоне скоростей вблизи зоны смешанных результатов. При этом границы этой зоны имеют существенное значение и должны быть надежно подтверждены. Для этого в достаточно узком диапазоне должно быть получено не менее 2-х непробитий при скоростях меньше $v_{min\ проб}$ и соответственно не менее 2-х пробитий при скоростях больше $v_{max\ непр}$. Исходя из практического опыта и правил определения пределов непробития, величина диапазона для подтверждения границ должна составлять 20 м/с. Предлагаемые правила определения зачетного диапазона испытаний иллюстрируются данными табл. 11.4.

Количество опытов, достаточных для надежного определения характеристик защиты, связано со стабильностью защитных характеристик испытываемого образца, которую можно характеризовать шириной зоны смешанных результатов. Если ширина зоны смешанных результатов относительно невелика – менее 40 м/с, то для

надежного определения значения v_{50} достаточно получения внутри нее 10 результатов. Т.е. в среднем в диапазоне скоростей 4...5 м/с необходимо иметь хотя бы один результат. Соответственно, в случае большей ширины зоны смешанных результатов количество опытов должно быть увеличено. Если зона смешанных результатов отсутствует, то необходимо стремиться уменьшить размах скоростей от $v_{\text{max непр}}$ до $v_{\text{min проб}}$, добиваясь того, чтобы он не превышал 10 м/с. Рекомендуемый объем испытаний в зависимости от ширины зоны смешанных результатов представлен в табл. 11.5.

Таблица 11.4.

Правила определения зачетного диапазона скоростей.

Реализуемый случай	Нижняя граница зачетного диапазона скорости	Верхняя граница зачетного диапазона скорости
$v_{\text{min проб}} < v_{\text{max непр}}$	$v_{\text{min проб}} - 20$ м/с	$v_{\text{max непр}} + 20$м/с
$v_{\text{min проб}} \geq v_{\text{max непр}}$	$v_{\text{max непр}} - 20$ м/с	$v_{\text{min проб}} + 20$ м/с

Таблица 11.5.

Правила определения необходимого количества зачетных опытов.

Реализуемый случай	Количество необходимых опытов			Общее количество опытов
	в зоне меньших скоростей	в зоне смешанных результатов	в зоне больших скоростей	
$0 < v_{\text{max непр}} - v_{\text{min проб}} \leq 40$ м/с	2	10	2	14
40 м/с $< v_{\text{max непр}} - v_{\text{min проб}} < 60$ м/с	2	14	2	18
$v_{\text{max непр}} - v_{\text{min проб}} \geq 60$ м/с	2	16	2	20

Схемы определения зачетного диапазона скоростей для случаев наличия или отсутствия зоны смешанных результатов представлены на рис.11.16 и 11.17.

При проведении испытаний следует стремиться к тому, чтобы соотношение опытов, в которых наблюдается пробитие, и опытов, в которых его не было в зачетном диапазоне скоростей, приближалось к 50:50.

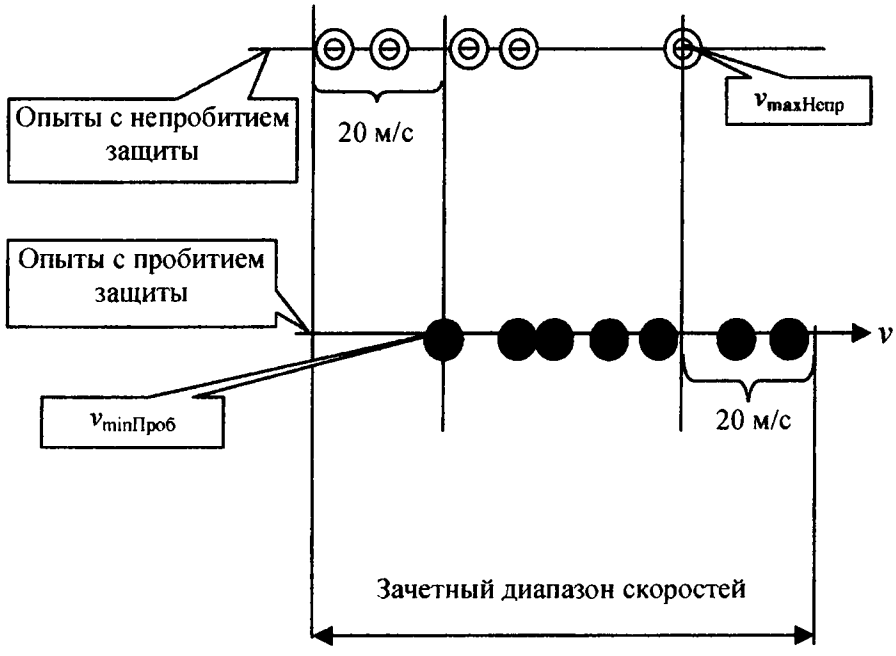


Рис. 11.16. Схема определения зачетного диапазона скоростей в случае наличия зоны смешанных результатов.

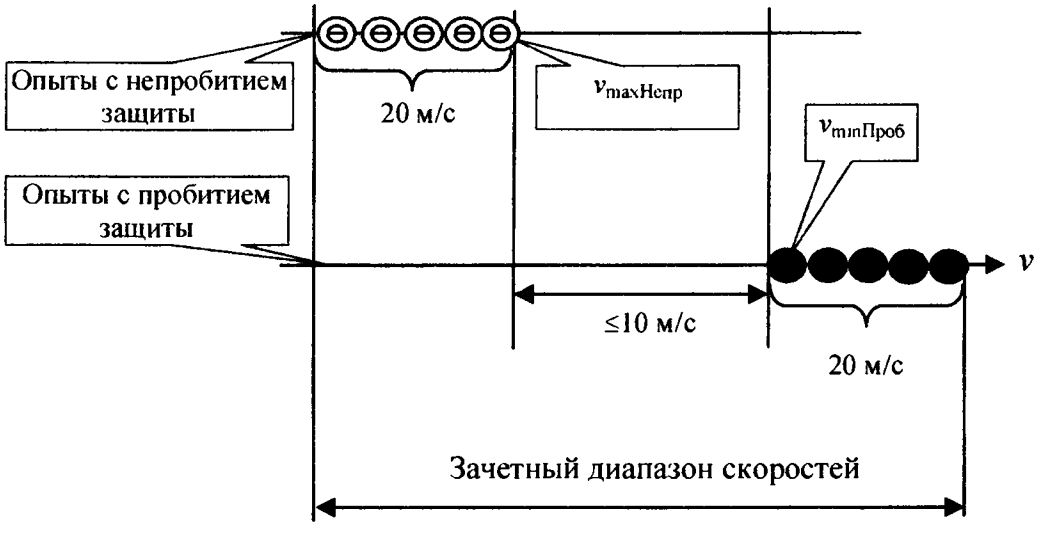


Рис. 11.17. Схема определения зачетного диапазона скоростей в случае отсутствия зоны смешанных результатов

Такие условия проведения испытаний позволяют существенно сократить необходимое количество опытов. При выполнении указанных выше условий в случае наличия относительно узкой зоны

смешанных результатов достаточно проведения 14 зачетных опытов. Этот случай наиболее характерен для большинства испытываемых материалов. При отсутствии зоны смешанных результатов достаточно 10 зачетных опытов. Таким образом, предлагаемая методика проведения испытаний обеспечивает сокращение необходимого количества опытов в 1,5...2 раза.

Следует отметить, что получение только характеристики v_{50} по результатам достаточно большого числа опытов является явно недостаточным. Поэтому в НИИ стали разработана методика и программа расчета обработки экспериментальных результатов с целью извлечения максимальной информации.

Методика позволяет определить значение v_{50} и распределение вероятности непробития образца в зависимости от скорости поражающего элемента. v_{50} определяется по распределению частости непробитий в зависимости от скорости при значении частости непробития равном 50 %.

Распределение частости непробития в зависимости от скорости поражающего элемента определяется расчетным путем при использовании следующих допущений:

– все испытания независимы;

– результат каждого испытания альтернативен: пробитие или непробитие;

– при конкретном значении скорости вероятность непробития одинакова во всех испытаниях;

– характер изменения вероятности непробития образца при изменении значений скорости – монотонный (при увеличении скорости поражающего элемента вероятность непробития уменьшается).

Первые три допущения позволяют использовать для статистического анализа схему повторных испытаний и закономерности биномиального распределения. Частость непробития для конкретного значения ударной скорости определяется с использованием четвертого допущения. Суть метода состоит в том, что случай непробития при любом конкретном значении скорости поражающего элемента можно распространить на все случаи непробития с меньшим значением скорости, т.е. если получено непробитие при большей скорости соударения, то при меньшей скорости тем более пробития не будет, и результат этого испытания можно добавить к ка-

ждому из испытаний с меньшей скоростью. И наоборот, пробитие при любом конкретном значении скорости можно распространить на все случаи пробития с большим ее значением.

Таким образом, для любого конкретного значения скорости информативными являются все опыты с непробитием при скоростях не менее заданной (обозначим их как накопленное количество непробитий) и все опыты с пробитием при скоростях не более заданной (обозначим их как накопленное количество пробитий).

Исходными данными для расчета являются значения скорости и результат: пробитие (н – некондиция) или непробитие (к – кондиция), для примера приведенные в табл. 11.6.

Порядок расчета:

В начале определяются количества пробитий и непробитий для каждого из полученных значений скорости.

Затем, определяются накопленные количества пробитий для каждого из полученных значений скорости.

Таблица. 11.6.

Исходные экспериментальные данные для определения характеристик противопульной стойкости защитной структуры.

№ оп, п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Скорость v, м/с	554	594	572	556	546	585	605	604	549	565
Результат	к	н	н	к	к	к	н	н	к	н
№ оп	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Скорость v, м/с	573	590	580	557	584	566	583	576	558	579
Результат	к	н	к	к	н	к	н	н	к	н

Для этого к числу пробитий при данной скорости прибавляется общее число пробитий при скоростях меньше данной. А также определяются накопленные количества непробитий для каждого из полученных значений скорости. Для этого к числу непробитий при данной скорости прибавляется общее число непробитий при скоростях равной или больше данной. На рис. 11.18. представлена диаграмма, иллюстрирующая правила нахождения накопленных количеств результатов.

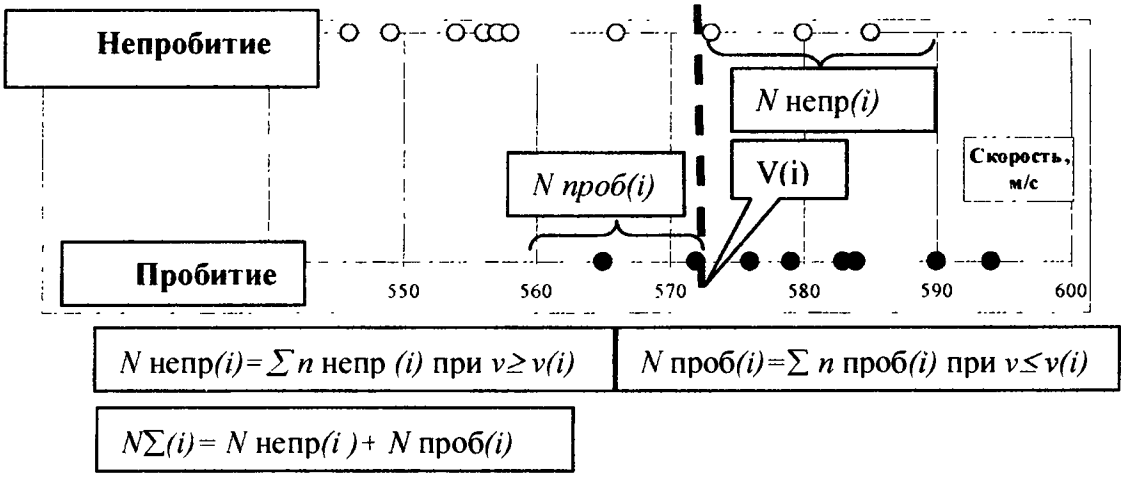


Рис. 11.18. Диаграмма, иллюстрирующая правила нахождения накопленных количеств результатов.

Далее по формуле $K_i = \dfrac{N_{непр(i)}}{N_{непр(i)} + N_{проб(i)}}$ определяется опытная частость непробитий как отношение накопленного количества непробитий к общему накопленному количеству результатов (пробитий и непробитий) для каждого конкретного значения скорости, где $N_{непр(i)}$ – накопленное количество непробитий; $N_{проб(i)}$ – накопленное количество пробитий; индекс i указывает на скорость, при которой определяется частость.

В качестве примера приведем расчет опытной частости непробития в зависимости от значения скорости по исходным данным табл. 11.6. Результаты расчетов сведены в табл. 11.7.

В первом приближении v_{50} оценивается как скорость, которой соответствует значение опытной частости равное 0,5 (50 %). Если нет значения опытной частости равного 0,5, то v_{50} определяется интерполяцией ближайших к нему значений. Для приведенных данных значение v_{50} составляет 574,5 м/с.

Кроме того, для удобства использования полученных результатов и преимуществ, которые будут показаны далее, по найденному распределению частости определяются параметры сглаженного распределения, соответствующего нормальному закону. Для нахождения параметров нормального закона для каждого значения час-

тости, найденного при обработке опытных данных, определяется квантиль нормального распределения. Для этого может использоваться стандартная функция «НОРМСТОБР» из программы «EXCEL» или данные из любого справочника по статистике. Линеаризация квантилей по величине скорости (рис. 11.19), проводимая по методу наименьших квадратов, позволяет определить наилучшие характеристики нормального закона распределения вероятности непробития в зависимости от ударной скорости.

Таблица 11.7.

Результаты расчетов опытной частости непробития по исходным данным табл. 11.6.

Скорость, м/с (в порядке возрастания)	Результат К-непробитие Н- пробитие	Количество непробитий	Количество пробитий	Накопленное кол-во непробитий *N непр(i)*	Накопленное кол-во пробитий *N проб(i)*	Общее количество накопленных результатов *NΣ(i)*	Опытная частость непробитий *K(i)*
546	к	1	0	10	0	10	1,000
549	к	1	0	9	0	9	1,000
554	к	1	0	8	0	8	1,000
556	к	1	0	7	0	7	1,000
557	к	1	0	6	0	6	1,000
558	к	1	0	5	0	5	1,000
565	н	0	1	4	1	5	0,800
566	к	1	0	4	1	5	0,800
572	н	0	1	3	2	5	0,600
573	к	1	0	3	2	5	0,600
576	н	0	1	2	3	5	0,400
579	н	0	1	2	4	6	0,333
580	к	1	0	2	4	6	0,333
583	н	0	1	1	5	6	0,167
584	н	0	1	1	6	7	0,143
585	к	1	0	1	6	7	0,143
590	н	0	1	0	7	7	0,000
594	н	0	1	0	8	8	0,000
604	н	0	1	0	9	9	0,000
605	н	0	1	0	10	10	0,000

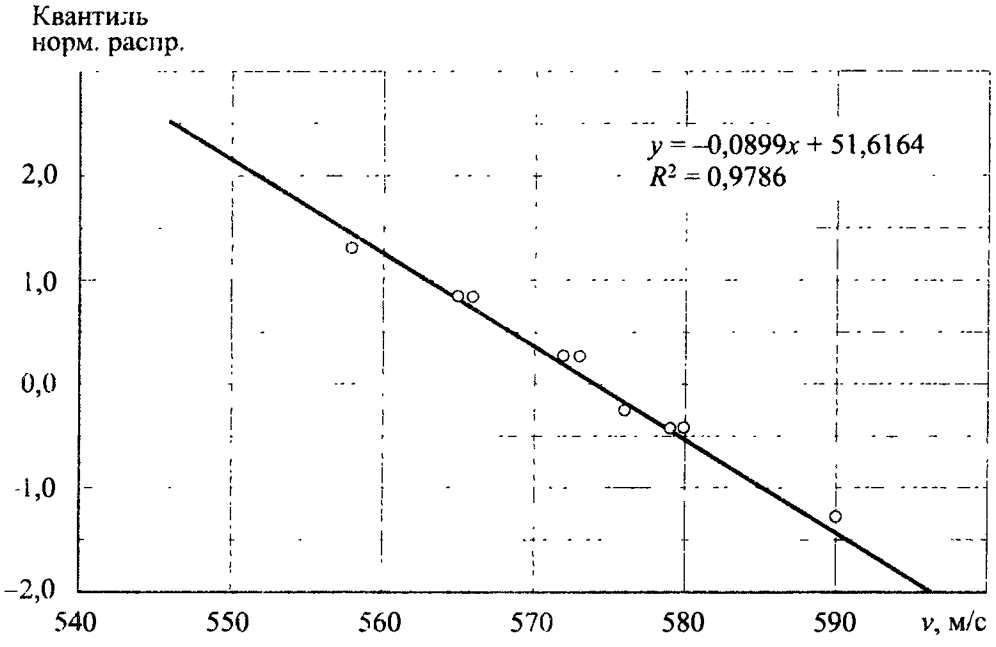


Рис. 11.19 Схема определения характеристик сглаживающего нормального распределения

Эти характеристики определяются точкой пересечения найденной прямой с осью абсцисс (это значение среднего арифметического нормального распределения, оно же значение v_{50}) и углом ее наклона (это значение стандартного отклонения нормального распределения). Высокое значение коэффициента корреляции (0,9786) подтверждает близость распределения опытных данных к нормальному закону и правомерность его применения. Зависимость вероятности непробития от скорости поражающего элемента и есть искомая аппроксимация опытной частости нормальным законом распределения, по которому легко определять значение вероятности непробития, соответствующей любому конкретному значению скорости.

Учитывая большую трудоемкость расчетов, целесообразно использовать компьютерную программу, разработанную в НИИ стали по изложенному выше алгоритму, простую в эксплуатации и широко опробованную в ряде испытательных центров. Время расчета соизмеримо со временем введения исходных данных и составляет несколько секунд. В результате расчета выводятся значения v_{50}, его доверительные границы с заданным уровнем вероятности и диаграмма изменения вероятности непробития в зависимости от вели-

чины скорости. Программу расчета целесообразно использовать также непосредственно в процессе испытаний, поскольку проводится анализ проведенных испытаний, определяется количество зачетных опытов и выдаются рекомендации по диапазону скоростей, в котором следует проводить испытания для получения наиболее достоверного результата.

Результаты обработки испытаний, приведенных в табл. 11.6, с использованием указанной выше программы расчета представлены на диаграмме рис. 11.20. и в табл. 11.8, 11.9. и 11.10.

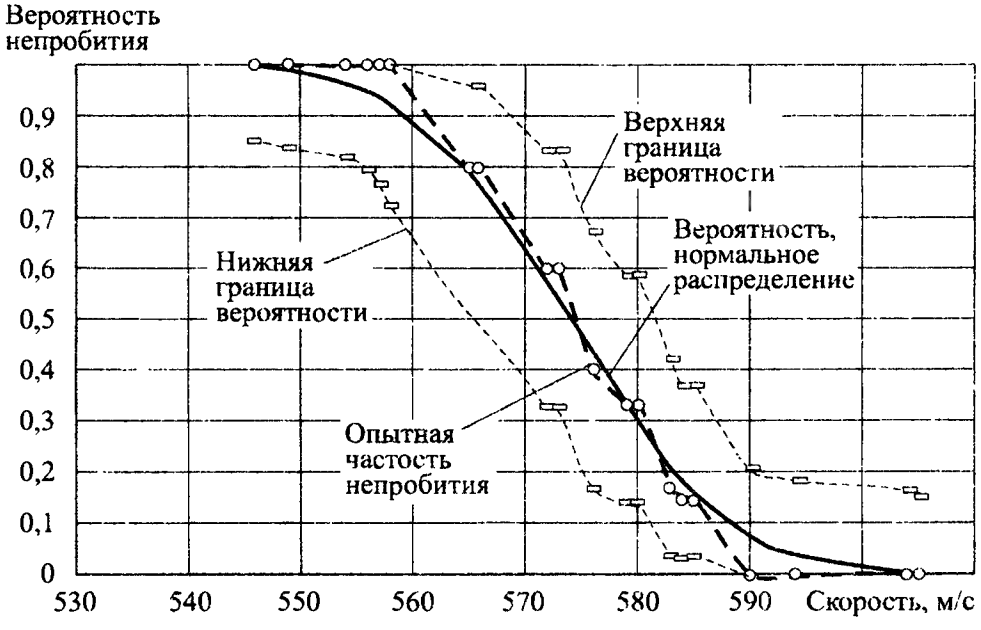


Рис. 11.20. Диаграмма распределения вероятности непробития, рассчитанная по исходным данным табл. 11.6.

Таблица 11.8

Информация, выводимая при расчете по программе.

Параметр	Параметр	Значение
v_{50} по измеренным значениям скорости	V_{50} изм	574
Скорость надежного непробития	V_{95} Непроб	556
Скорость надежного пробития	V_5 Непроб	592
Нижняя доверительная граница v_{50}	V_{50} Нижн. гран.	566
Верхняя доверительная граница v_{50}	V_{50} Верхн. гран.	582

Окончание табл. 11.8

Максимальная скорость НЕпробития	Vmax непроб.	585
Минимальная скорость пробития	Vmin проб.	565
Зона смешанных результатов	dV смеш.	20
Кол-во зачетных опытов	Nзачетн.	20
Общее число опытов	Nоп.	20
Доля результатов непробития	% непроб.	50,0

Таблица 11.9.

Информация, выводимая при расчете по программе с рекомендациями по объему проведенных испытаний.

Анализ результатов испытаний				
V50, м/с	574,5			
N оп ВСЕГО	20		N оп ЗАЧЕТ	20
Доля кондиционных результатов, %				50,0
Область	V1	V2	N оп	Рекомендации:
Имеется зона смешанных результатов				
Левая зона	545	565	6	—
Смешанная зона	565	585	10	—
Правая зона	585	605	4	—

В приведенной таблице рекомендации по проведению испытаний отсутствуют вследствие достаточности полученной информации.

Результаты расчетов, проведенные по первым десяти опытам, и соответствующие рекомендации, приведены в табл. 11.10.

В методике наиболее полно используется информация, полученная в испытаниях. Она не только позволяет определить значение v_{50}, но и дает распределение вероятности непробития защиты при изменении скорости поражающего средства, а также позволяет оценить значения $v_{\text{пкп}}$ и $v_{\text{псп}}$.

Таблица 11.10.

Информация, выводимая при расчете первых 10-и опытов табл.11.6. по программе с рекомендациями по объему дальнейших испытаний.

Анализ результатов испытаний				
V50, м/с	565,0			
N оп ВСЕГО	10		N оп ЗАЧЕТ	10
Доля кондиционных результатов, %				80
Область	V1	V2	N оп	Рекомендации:
Имеется зона смешанных результатов				
Левая зона	545	565	6	-
Смешанная зона	565	585	3	Продолжить испытания до получения десяти результатов
Правая зона	585	605	3	—

Рассчитанному по экспериментальным данным значению $v_{пкп}$ – соответствует определенное значение вероятности непробития, которое зависит от конкретных значений, полученных в опытах скоростей и может изменяться от 1 % до 20 %. Анализ ранее полученных результатов по определению баллистической стойкости различных защитных бронеструктур показывает, что наиболее часто значение $v_{пкп}$ соответствует 5 % вероятности пробития или 95 % вероятности непробития. Если задать уровень вероятности непробития, (например 0,95) для определения $v_{пкп}$, то его значение можно надежно рассчитывать с использованием представленного выше метода. При этом одновременно будет рассчитываться характеристика $v_{псп}$ – как скорость, соответствующая 5% вероятности непробития. Одновременное определение скоростей 5% и 95% вероятностей непробития, а также баллистического предела v_{50}, дает более полное представление о защитных характеристиках испытываемой преграды (рис. 11.21). При этом практически без увеличения объема испытаний существенно увеличивается их информативность.

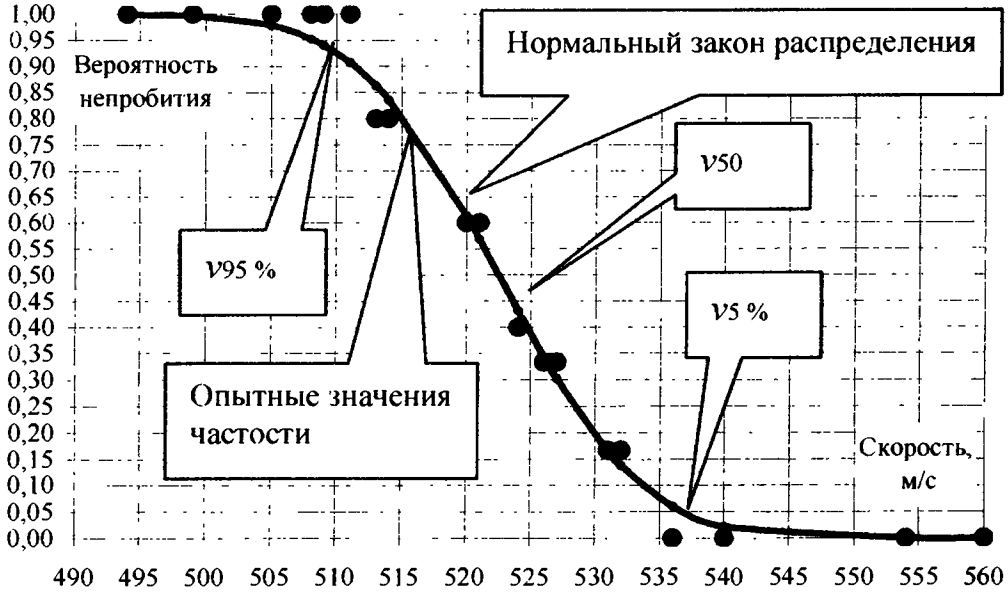


Рис. 11.21. Определение характеристик баллистической стойкости с использованием распределения частости непробития

Как уже отмечалось выше, при проведении испытаний по определению баллистического предела следует стремиться к тому, чтобы соотношение опытов, в которых наблюдается пробитие защитной структуры, и опытов, в которых пробития не было в зачетном диапазоне скоростей, приближалось к 50:50. Проанализируем степень влияния отклонения от указанного соотношения на значение v_{50}. Достаточно большой объем испытаний на противоосколочную стойкость – 40 пакетов ткани артикула 84127 по 20 выстрелов в каждый будем считать генеральной совокупностью, по которой определим значение v_{50}. Найденное по всем 800 опытам значение характеристики v_{50} будем считать истинным.

Результаты обработки всего массива данных приведены на диаграмме рис. 11.22. Найденное значение v_{50} составляет 559,4 м/с.

Затем, отсортировав общий массив данных по величине скорости, были рассчитаны значения v_{50} по тем же экспериментальным данным, выбранным в различных диапазонах скоростей. В таблице 11.11. приведены исходные данные, полученные при разбивке общего массива данных, и результаты расчетов v_{50}, а также погрешность относительно истинного значения v_{50}

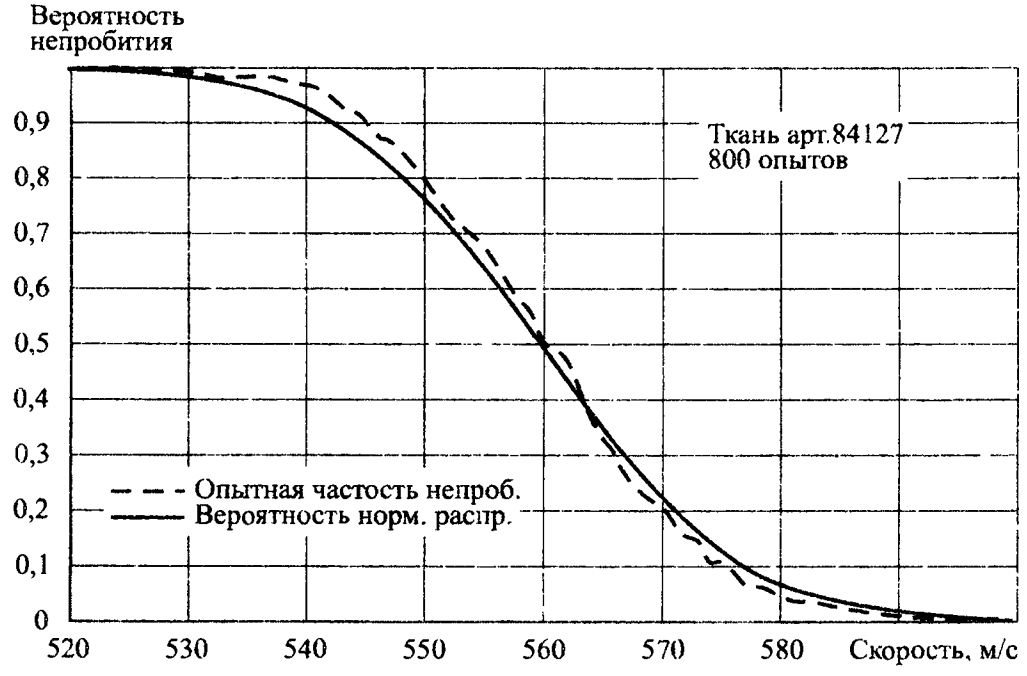


Рис. 11.22. Распределение вероятности непробития в зависимости от скорости для генеральной совокупности данных испытаний на противоосколочную стойкость пакетов ткани арт. 84127

При этом в каждом из диапазонов находилось 40 результатов опытов. Как видно из данных таблицы 11.11, чем меньше значения скорости в диапазоне, тем, как правило, выше частость кондиционных результатов. На рис. 11.22 приведена диаграмма изменения погрешности значения v_{50} относительно значения v_{50} для генеральной совокупности в зависимости от значения частости кондиционных результатов.

Представленные данные свидетельствуют о сильной зависимости погрешности определения значения v_{50} от величины частости кондиционных результатов, которая достаточно хорошо описывается линейной зависимостью. Причем, при меньших значениях частости кондиционных результатов, т.е. при повышенных скоростях, рассчитанное значение выше истинного, а при больших значениях частости кондиционных результатов, т.е. при пониженных скоростях, рассчитанное значение ниже истинного. Впервые аналогичные выводы были получены в работе [11.24]. На основании

Таблица 11.11.

Исходные данные и результаты расчетов при разбивке общего массива данных в различных диапазонах скоростей.

№ выборки	Границы диапазона скоростей, м/с		Частость кондиционных результатов, %	v_{50}, м/с	Погрешность, м/с	Погрешность, %
	v_1, м/с	v_2, м/с				
1	530	537	92,5	538,9	–22,4	–4,0
2	538	541	82,5	540,1	–18,4	–3,3
3	541	543	82,5	543,4	–16,4	–2,9
4	543	546	65,0	544,9	–13,4	–2,4
5	546	548	75,0	547,6	–11,4	–2,0
6	548	549	75,0	549,7	–10,4	–1,9
7	549	552	47,5	550,9	–7,4	–1,3
8	552	554	72,5	554,4	–5,4	–1,0
9	554	556	47,5	555,8	–3,4	–0,6
10	556	559	65,0	558,4	–0,4	–0,1
11	559	561	37,5	559,2	1,6	0,3
12	561	563	67,5	562,5	3,6	0,6
13	563	565	55,0	564,1	5,6	1,0
14	565	567	35,0	565,1	7,6	1,4
15	567	570	42,5	568,3	10,6	1,9
16	570	573	32,5	570,0	13,6	2,4
17	573	575	22,5	571,5	15,6	2,8
18	575	578	32,5	576,1	18,6	3,3
19	578	583	17,5	578,7	23,6	4,2
20	583	590	17,5	582,0	30,6	5,5

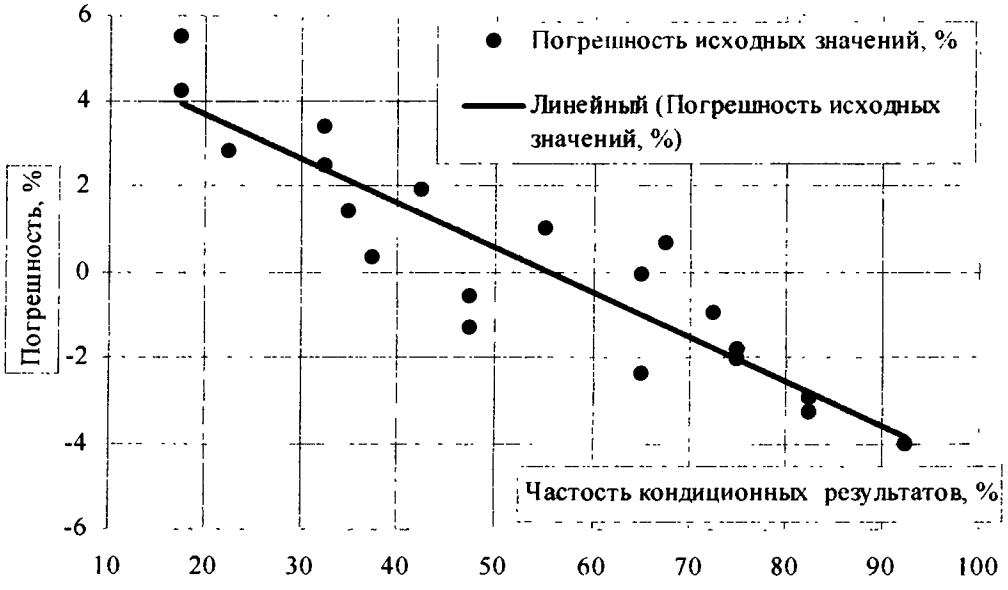


Рис. 11.23. Изменение погрешности значения v_{50} в зависимости от значения частости кондиционных результатов.

представленных результатов, а также многочисленных расчетов других серий экспериментов, зависимость погрешности (Погр) определения v_{50} от величины частости кондиционных результатов (Чкр) можно описать линейной зависимостью:

$$\text{Погр} = 5 - 0{,}1 \cdot \text{Чкр}.$$

Тогда, для приведения найденного по результатом конкретной серии опытов значения v_{50} к истинному значению ($v_{50\ ист}$) можно ввести поправочный коэффициент (Кч), зависящий от частости кондиционных результатов, полученной в опытах:

$$\text{Кч} = 1 + (5 - 0{,}1 \cdot \text{Чкр})/100,$$

где Чкр – частость кондиционных результатов, %.

$$v_{50\ ист} = v_{50} / \text{Чкр}$$

В табл. 11.12 и на рис. 11.24 приведены результаты определения значения v_{50} с учетом введения поправочного коэффициента и соответствующее изменение погрешности значения v_{50}

Таблица 11.12.

Исходные значения v_{50} и значения v_{50}, рассчитанные с поправкой в зависимости от частости кондиционных результатов.

Частость кондиционных результатов, %	v_{50} исходное, м/с	Погрешность, %	Кч	v_{50} с поправкой, м/с	Погрешность с поправкой, %
92,5	538,9	–4,0	0,960	561,6	0,39
82,5	540,1	–3,3	0,970	557,1	-0,41
82,5	543,4	–2,9	0,970	560,5	0,19
65,0	544,9	–2,4	0,987	552,0	-1,32
75,0	547,6	–2,0	0,977	560,5	0,20
75,0	549,7	–1,9	0,977	562,7	0,58
47,5	550,9	–1,3	1,005	548,4	-1,97
72,5	554,4	–1,0	0,980	566,0	1,18
47,5	555,8	–0,6	1,005	553,3	-1,09
65,0	558,4	–0,1	0,987	565,7	1,13
37,5	559,2	0,3	1,015	551,2	-1,46
67,5	562,5	0,6	0,985	571,4	2,14
55,0	564,1	1,0	0,997	565,8	1,15
35,0	565,1	1,4	1,017	555,6	-0,67
42,5	568,3	1,9	1,010	563,0	0,64
32,5	570,0	2,4	1,020	559,1	-0,05
22,5	571,5	2,8	1,030	555,1	-0,77
32,5	576,1	3,3	1,020	565,1	1,02
17,5	578,7	4,2	1,035	559,4	-0,01
17,5	582,0	5,5	1,035	562,6	0,57

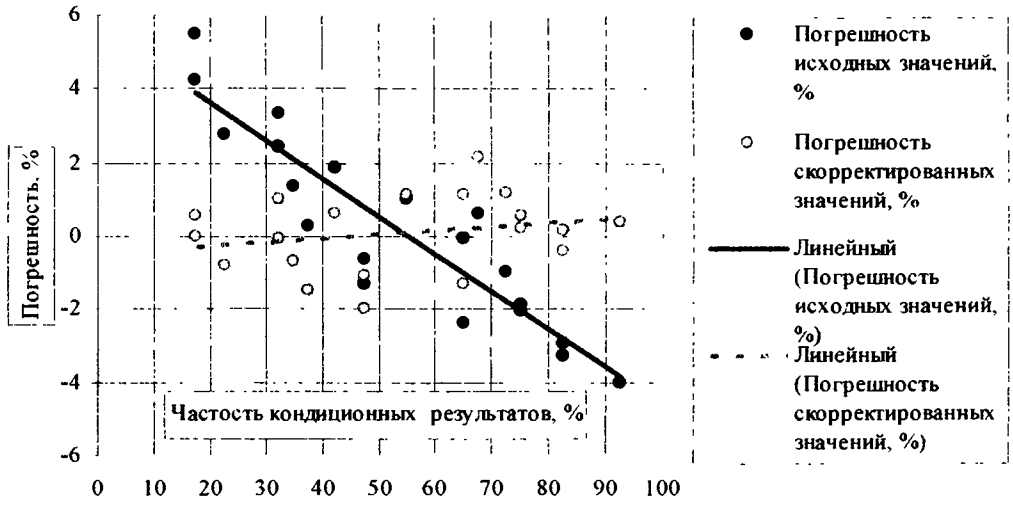


Рис. 11.24. Изменение исходной погрешности значения v_{50} и погрешности с учетом введения поправки в зависимости от значения частости кондиционных результатов.

При введении поправочного коэффициента погрешность определения v_{50} практически не зависит от значения частости кондиционных результатов и существенно меньше (не более 2 %), исходной погрешности, которая достигала значений 4...5 %.

Можно еще раз обратить внимание на то, что в экспериментах по определению баллистического предела следует стремиться к тому, чтобы частость как кондиционных, так и некондиционных результатов приближалась к 50%, однако, если получено существенное отличие от 50 % рекомендуется рассчитать истинное его значение с учетом поправочного коэффициента.

11.3. Экспериментальное определение баллистической энергоемкости защитных структур

Назначение защитной структуры – поглощение или рассредоточение энергии средства поражения в процессе взаимодействия, вследствие чего, снижается энергия, передаваемая располагаемому за ней объекту, и интенсивность воздействия на объект становится ниже допустимого уровня. Чем больше энергия, поглощаемая защитой, то есть чем выше ее энергоемкость, тем надежнее защита. Поэтому предлагаемый метод экспериментального определения

баллистической энергоемкости защитных структур может внести свой вклад в совершенствование средств индивидуальной защиты.

Наиболее обоснованное применение метод находит [11.25-11.29] при исследовании воздействия недеформируемых пуль или стальных имитаторов осколков на тканевые бронематериалы. В этом случае не возникает методических вопросов, связанных с идентификацией элемента, проникающего в запреградное пространство. После пробития неметаллических преград ударник сохраняет форму и целостность, его масса не изменяется и не образуются вторичные осколки. Поэтому для определения запреградной скорости можно обойтись без рентгено-импульсной или высокоскоростной оптической регистрации процесса и использовать относительно простые измерители скорости. Энергоемкость защиты, определяемая как разность кинетической энергии ударника до преграды и после ее пробития, в этом случае определяется достаточно надежно. Схема соответствующей экспериментальной методики представлена на рис. 11.25.

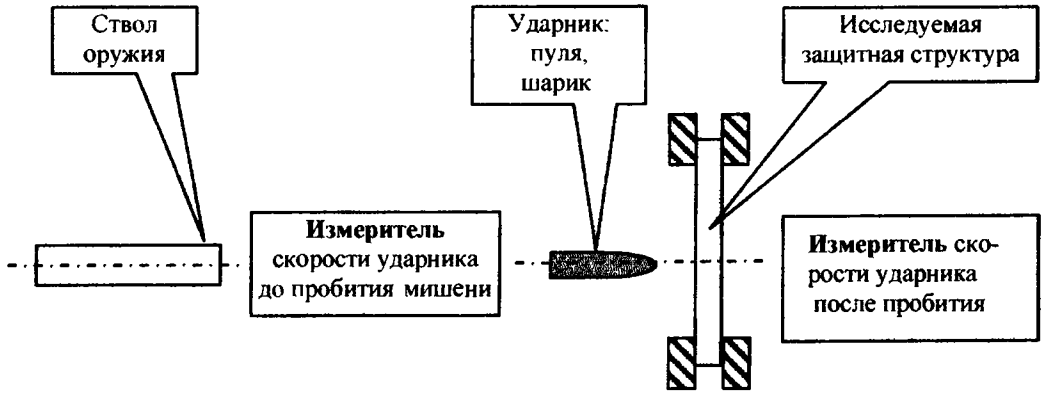


Рис. 11.25. Схема эксперимента по определению энергоемкости защитной структуры

Следует отметить, что для надежного определения энергоемкости измеренные в эксперименте скорости необходимо приводить с учетом падения скорости на участках от измерителя скорости до поверхности исследуемой защитной структуры соответственно к лицевой и тыльной поверхностям.

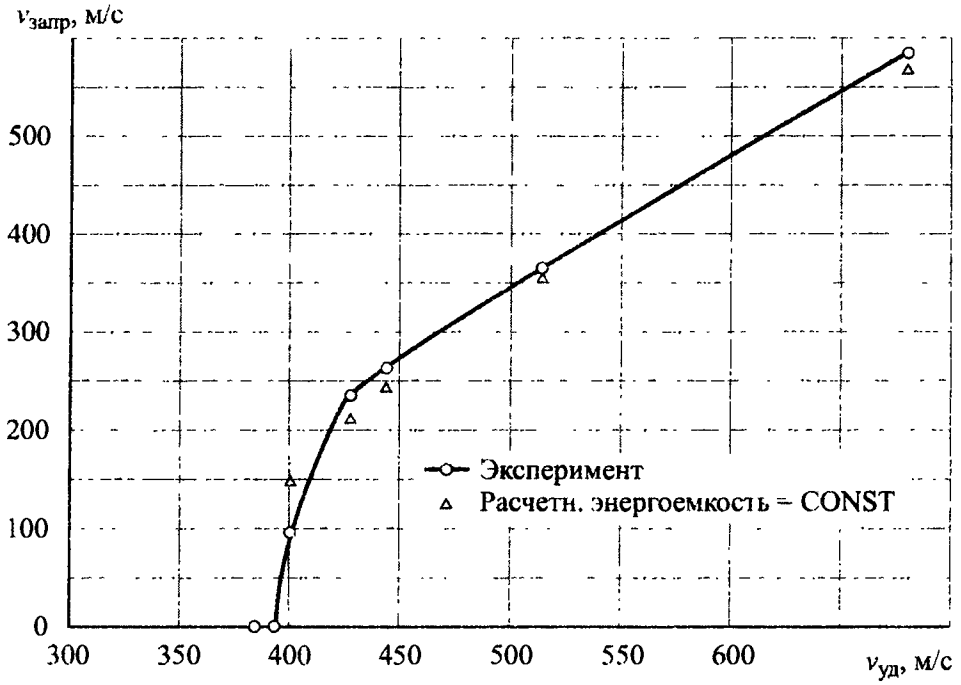


Рис. 11.26. Результаты по определению ударной и запреградной скоростей при воздействии стандартных стальных шариков массой 1,03г на 18-слойные тканевые пакеты из ткани К-12.

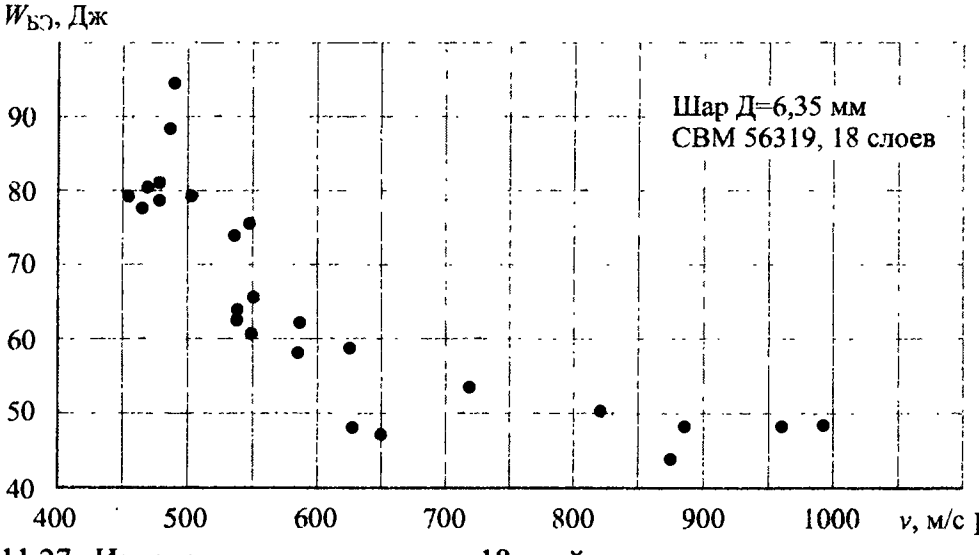


Рис. 11.27. Изменение энергоемкости 18-слойного тканевого пакета при его пробитии в зависимости от ударной скорости.

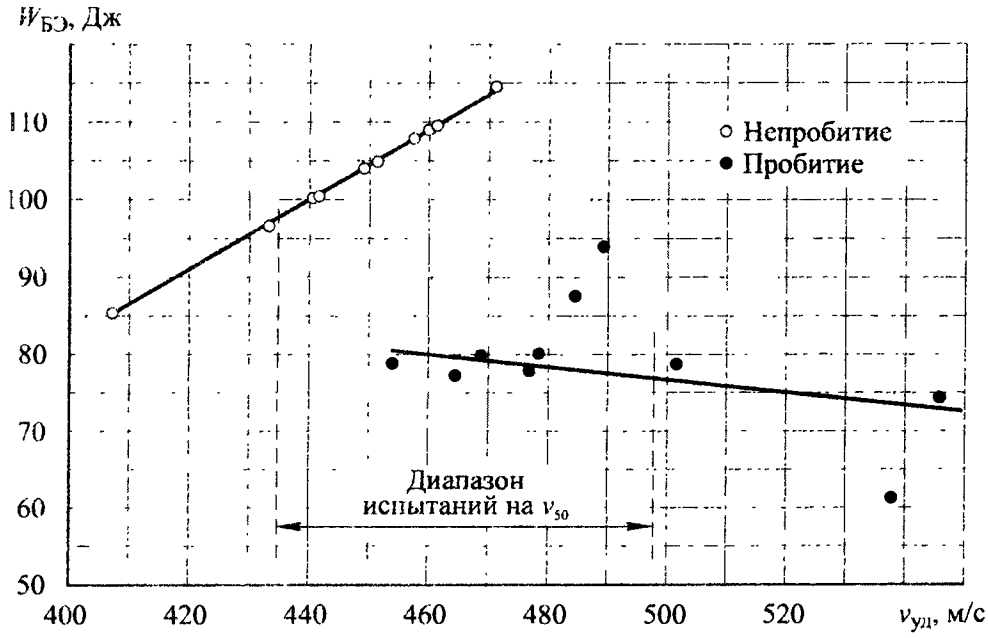


Рис. 11.28 Энергоемкость 18-слойного тканевого пакета в диапазоне скоростей, при которых определяется v_{50}.

На рис. 11.26 приведены результаты по определению ударной и запреградной скоростей при воздействии стандартных стальных шариков массой 1,03 г на 18-слойные тканевые пакеты из ткани К-12. На этом же рисунке приведены расчетные значения запреградной скорости, определенные при постоянной энергоемкости тканевого пакета, удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными результатами.

При экспериментальном определении баллистической энергоемкости текстильной брони установлено [11.25.-11.27.], что ее энергоемкость уменьшается с увеличением ударной скорости. Приведенные на рис. 11.27. результаты экспериментального исследования 18-слойного пакета ткани показывают, что при изменении скорости ударника от 450 м/с до 900 м/с энергоемкость снижается в 2 раза. Причем более резкое изменение энергоемкости наблюдается в зоне скоростей, примыкающей к баллистическому пределу стойкости пакета. Теоретический анализ баллистической энергоемкости текстильных пакетов дан в гл. 3.

Представляет интерес более подробное рассмотрение изменения энергоемкости в диапазоне скоростей воздействия, в котором

наблюдаются случаи как пробития, так и непробития исследуемой защитной структуры. В случае непробития защиты ею поглощается вся энергия ударника.

На рис. 11.28. представлена закономерность изменения энергоемкости 18-слойного пакета в зоне смешанных результатов при изменении ударной скорости в диапазоне скоростей испытаний по определению v_{50}. Полученные результаты показывают, что при максимальной скорости непробития, составляющей 470 м/с, энергоемкость пакета достигает значения 115 Дж, а при минимальной скорости пробития – 450 м/с энергоемкость составляет 80 Дж. Разброс скоростей от максимальной скорости непробития до минимальной скорости пробития может достигать 40...60 м/с, что соответствует изменению поглощаемой энергии энергоемкости 40...50 Дж.

Были проведены испытания тканевых пакетов с различным количеством слоев (4, 6, 12, 18 и 30 слоев) при прострелe стандартным имитатором осколка. По результатам испытаний и обработки полученных экспериментальных данных по способу наименьших квадратов определена энергоемкость единичного слоя Е1 ткани и подобрана аппроксимирующая экспоненциальная зависимость энергоемкости в зависимости от скорости v взаимодействия: $W_{БЭ1}=9 \cdot \exp\{-0{,}0015 \cdot v\}$. Энергоемкость единичного слоя конкретной ткани является показателем, характеризующим ее баллистические свойства.

На основе полученных результатов, в предположении о последовательном поглощении энергии ударника независимыми слоями ткани, разработана инженерная методика и программа расчета баллистической стойкости тканевых защитных структур. Исходными данными являются энергоемкость единичного слоя, ударная скорость и количество слоев ткани в бронепакете. В результате расчета определяются послойно поглощаемая энергия и скорость ударника. Кроме того, в цикле с заданным шагом варьируется значение ударной скорости и для каждого из них определяется количество слоев ткани, обеспечивающих надежную защиту, соответствующих пределу кондиционного поражения $v_{пкп}$, и количество слоев, соответствующих баллистическому пределу v_{50}.

При проведении испытаний по определению v_{50} при ударной скорости, соответствующей значению v_{50}, запреградная скорость

ударника в случае пробития преграды находится на уровне 200...300 м/с, что соответствует энергии 30...40 Дж. Поэтому при расчете количества слоев, соответствующих скорости v_{50} принималось такое количество слоев, за которым тыльная энергия составляет 35 Дж. На рис. 11.29. и 11.30. представлены расчетные и экспериментальные данные по количеству слоев, соответствующих баллистическому пределу, и значения запреградной скорости в зависимости от ударной для 4, 6, 12, 18 и 30-слойных тканевых пакетов. Несмотря на упрощенное допущение о послойном поглощении энергии ударника, представленные результаты свидетельствуют об удовлетворительном согласии расчетных и экспериментальных данных [11.29].

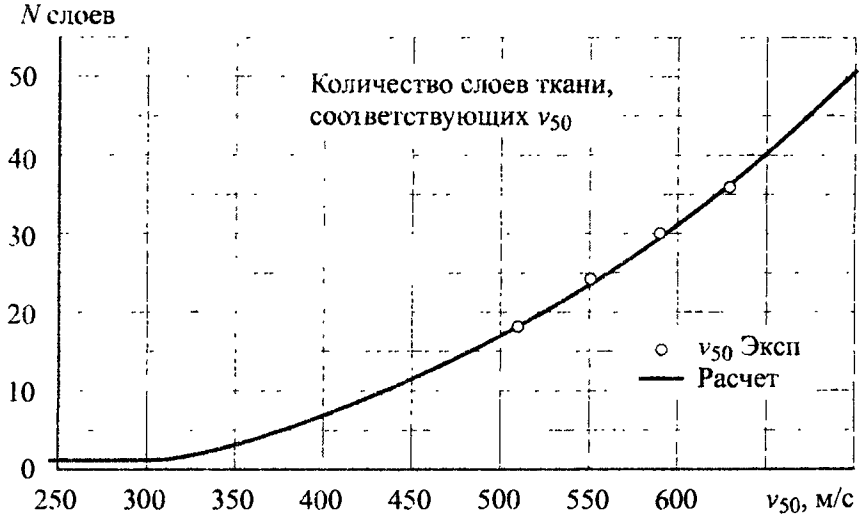


Рис. 11.29. Экспериментальные и расчетные данные по зависимости количества слоев от значения баллистического предела v_{50}.

При проведении дальнейших исследований и определении аналогичных характеристик для различных типов тканей с использованием разработанной расчетной модели можно проводить оптимизацию комбинированных многослойных структур защиты на основе текстильной брони.

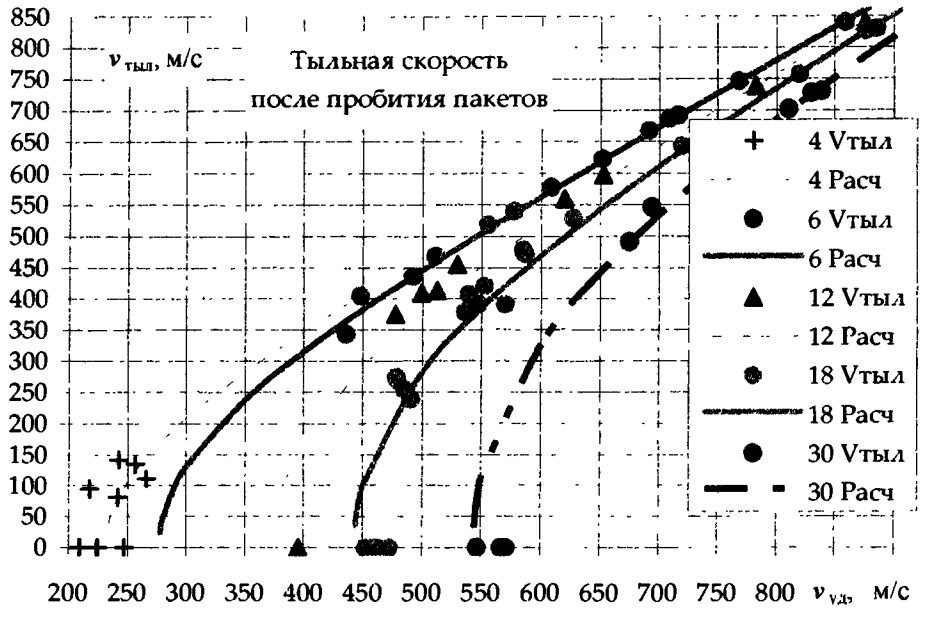


Рис. 11.30. Экспериментальные и расчетные данные по зависимости тыльной скорости при варьировании ударной скорости для тканевых пакетов с различным количеством слоев.

Учитывая, что скорость взаимодействия ударника с преградой изменяется в процессе проникания, по мере его внедрения в защитную структуру, информация об энергоемкости различных материалов в зависимости от скорости взаимодействия представляется весьма существенной. В качестве иллюстрации на рис. 11.31. приведены результаты исследований по определению энергоемкости для трех защитных структур при пробитии их стальным шариком массой 1,03 г. в зависимости от скорости соударения листа из алюминиевого сплава АБТ, толщиной 3,4 мм; 6-слойного тканевого пакета из баллистической ткани СВМ и 12-слойного тканевого пакета из баллистической ткани СВМ.

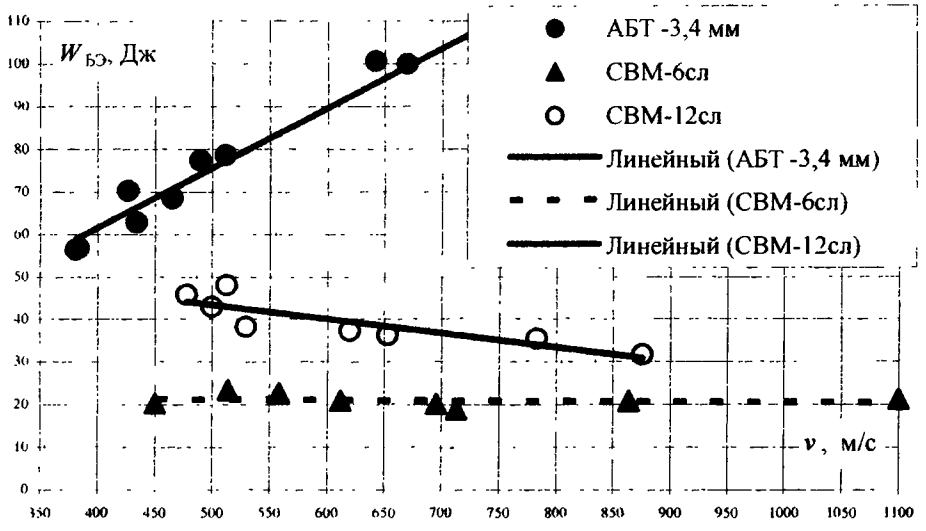


Рис. 11.31. Изменение энергоемкости в зависимости от скорости соударения. Ударник: стальной шарик d=6,35 мм, m=1,03 г. Мишени: пластина алюминиевая (АБТ), B=3,4 мм; ткань ТСВМ, арт. 56319, 6 слоев; ткань ТСВМ, арт. 56319, 12 слоев.

После пробития тканевого пакета шарик оставался целым, недеформированным. В экспериментах с алюминиевой преградой в запреградное пространство проникал шарик вместе с алюминиевой пробкой, масса которой составляла 0,2 г, что учитывалось при определении энергии, израсходованной на пробитие мишени.

Приведенные данные показывают, что энергоемкость алюминиевой пластины существенно зависит от скорости удара, при этом с увеличением скорости она возрастает практически линейно (коэффициент корреляции для линейной зависимости равен 0,96). Для относительно тонкого тканевого пакета (6 слоев) энергоемкость практически не зависит от скорости удара в диапазоне изменения от 450 до 1100 м/с. Для 12-слойного пакета энергоемкость зависит от скорости и снижается при увеличении скорости удара.

Результаты проведенных испытаний по определению энергоемкости согласуются с выводом, известным разработчикам СИБ, о том, что в комбинированной защитной структуре тканевые материалы целесообразно использовать в тыльных слоях, предвари-

тельно погасив скорость ударника в лицевых слоях из других материалов.

Метод экспериментального определения энергоемкости различных материалов является перспективным, и при накоплении данных для различных материалов, используемых в средствах защиты, позволит целенаправленно оптимизировать структуру и конструкцию защиты.

11.4. Требования к установке образцов в процессе динамических испытаний

При испытаниях на пулестойкость образец индивидуальной защиты устанавливается в специальной бронекабине и производится его обстрел с регистрацией ударной скорости и определением результатов воздействия средства поражения. Общим требованием к установке образца является обеспечение условий взаимодействия со средством поражения, близким к реальным условиям применения. Для имитации реальных условий разрабатываются специальные манекены, на которые устанавливаются образцы средств индивидуальной защиты.

При испытаниях на противопульную стойкость бронежилет устанавливается на специальном манекене (рис. 11.32.), представляющем собой деревянный блок, массой 40 кг, имитирующий туловище человека, обитый грубошерстным войлоком толщиной 20 мм, установленный на специальной подставке.

Отдельные фрагменты бронежилета или его защитная структура могут испытываться на упрощенных имитаторах, также представляющих собой деревянный блок обитый войлоком толщиной 20 мм с плоской или выпуклой поверхностью, или пластилиновый блок (рис.11.33).

Испытания на пластилиновом блоке проводятся с целью оценки забронегового действия. В стандарте США [11.27.] в качестве показателя забронегового действия принимается глубина отпечатка в пластилине, которая для кондиционных защитных бронеструктур не должна превышать 44 мм. Измерение глубины отпечатка проводят с использованием специального инструмента (рис.11.34). При этом к пластилину предъявляются определенные требования. Пла-

Рис. 11.32. Манекен для испытаний бронежилетов на пулестойкость

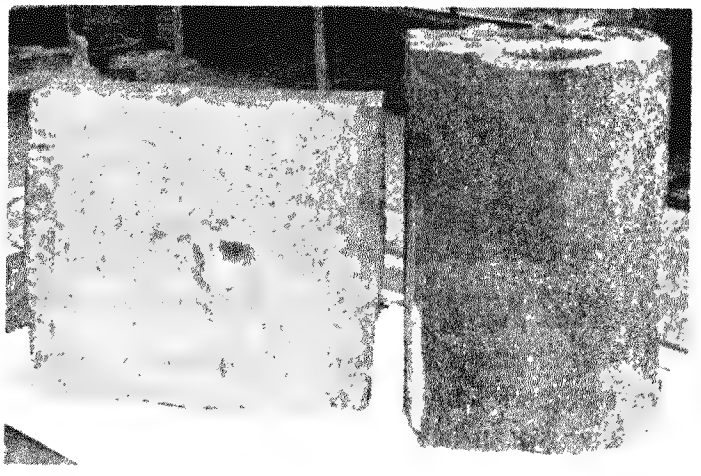


Рис. 11.33. Имитаторы для испытаний бронежилетов (слева – пластилиновый блок, справа – войлочный

стилин должен быть тщательно перемешан, чтобы исключить в нем пустоты, а затем выровнен, чтобы образовалась плоская поверхность, обеспечивающая точность измерений глубины вмятины. Пластилин должен быть доведен до определенной кондиции путем нагрева его в течение 3-х часов в специальной камере при температуре не ниже 29°С. Перед испытаниями осуществляется калибровка материала пластилина сбрасыванием с высоты 2 м стального шара диаметром 63,5±0,05 мм, массой 1043±5 г. Калибровка пластилина должна производится также как до, так и после каждого из 6 выстрелов. Место сбрасывания 76±3 мм от краев ящика и 203±25 мм между центрами вмятин.

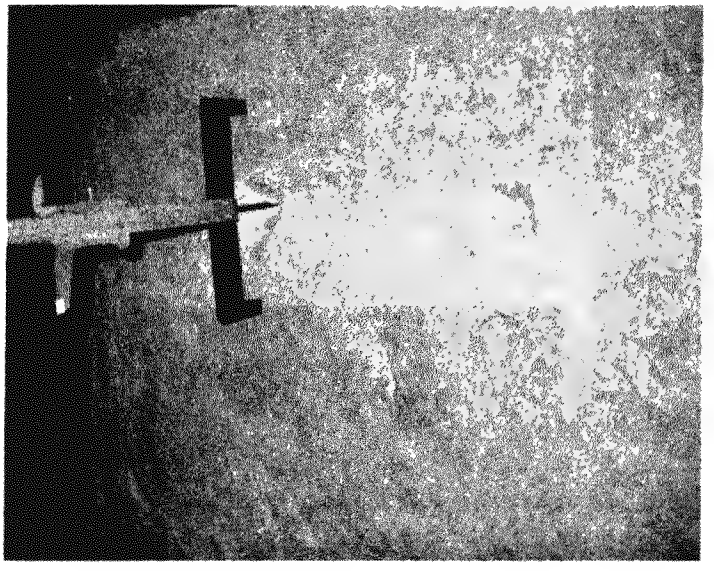


Рис.11.34. Измерение глубины отпечатка на пластилиновом имитаторе.

Каждое калибровочное испытание производится путем свободного сбрасывания стального шара на подготовленную поверхность пластилинового блока, используемого в качестве тыльного подпора. Должно быть проведено минимум 5 калибровочных сбрасываний груза. Среднее арифметическое измеренных глубин отпечатков должно укладываться в пределы 20±3 мм. Глубина отпечатка измеряется обычным глубиномером. Расположение точек, в которые сбрасывается груз при калибровке перед испытаниями, приведено на рис.11.35.

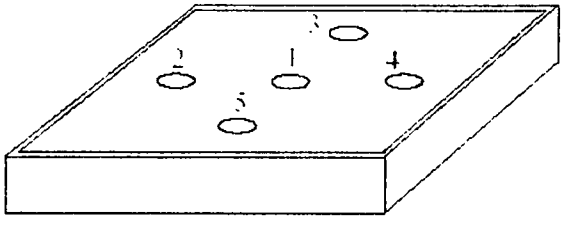


Рис.11.35. Общее расположение точек сбрасывания груза при калибровке перед испытаниями.

Существенное влияние материала манекена можно проиллюстрировать результатами, приведенными на рис. 11.36. и 11.37, по

определению противоосколочной стойкости тканевых пакетов из ткани арт. 56319 с различным количеством слоев.

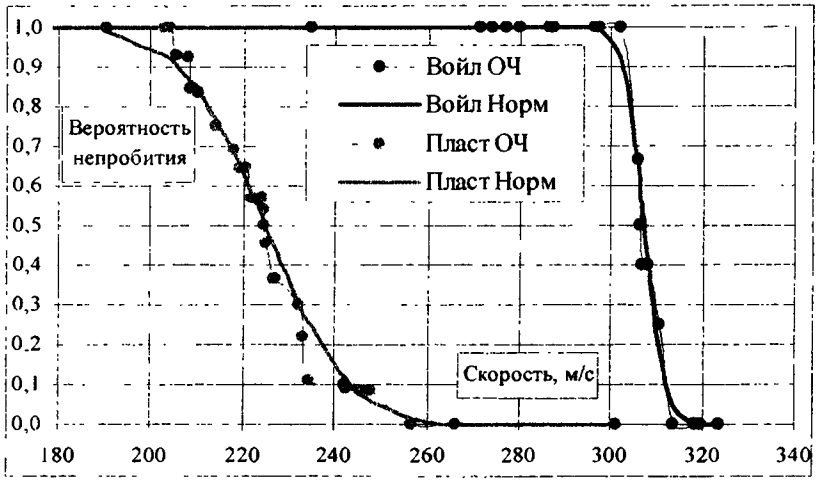


Рис.11.36. Распределение вероятности непробития 4-слойного пакета ткани арт 56319 при расположении его на войлочном и пластилиновом манекенах (ОЧ – опытная частость, Норм – нормальное распределение).

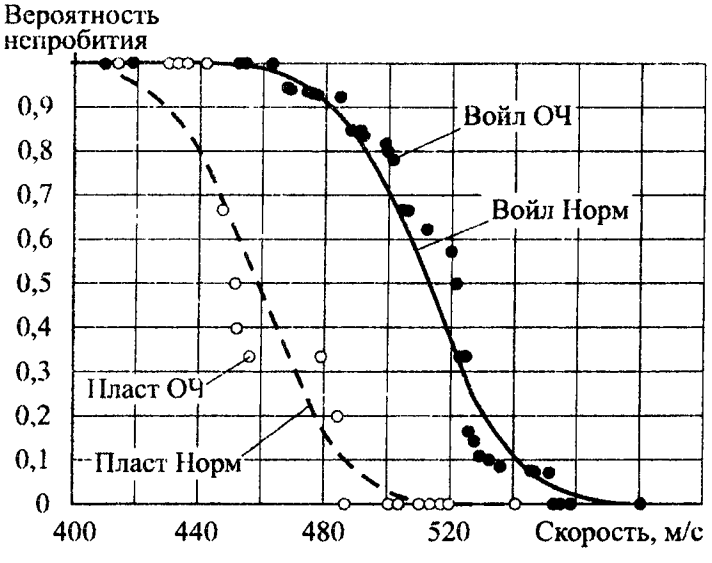


Рис. 11.37 Распределение вероятности непробития 20-слойного пакета ткани арт 56319 при расположении его на войлочном и пластилиновом манекенах.

Как следует из приведенных данных, различие в значениях баллистического предела при расположении на войлочном и пластили-

новом манекенах составляет для 20-слойного пакета 11 % (512 м/с и 458 м/с, соответственно). Еще сильнее проявляется влияние подложки для более тонкого 4-слойного пакета, 37 % (308 м/с и 224 м/с, соответственно).

Таким образом, материал подложки или материал имитатора имеет существенное значение для результатов испытаний на противопульную и противоосколочную стойкость (смотри главу 3).

Испытания бронешлемов проводятся на имитаторе головы человека (рис. 11.38.)

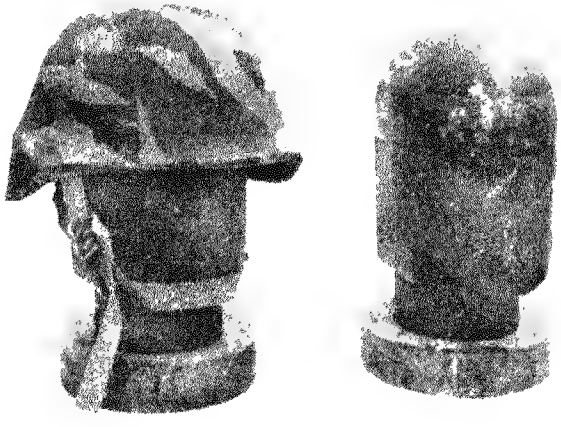


Рис. 11.38 Манекены для испытаний бронешлемов. Отдельно манекен и манекен с установленном на нем бронешлемом.

Следует отметить, что испытываемый бронешлем должен устанавливаться на манекене соответствующего ему размера.

В практике испытаний бронешлемов отмечались случаи, когда пытались определить противопульную стойкость заготовок бронешлемов без подтулейного устройства, которое обеспечивает правильное расположение шлема на голове человека. При этом, в отсутствии подтулейного устройства шлем не мог быть установлен на манекене, и соответственно устанавливался, опираясь тыльной частью на деревянную подставку. Полученные результаты при таком способе установки бронешлема оказались лучше, чем при последующих испытаниях на манекене головы шлема с подтулейным устройством.

Анализ результатов показал, что при нормальной установке шлема на манекене головы с помощью подтулейного устройства, которое обеспечивает гарантированный зазор между внутренней поверхностью шлема и манекеном в пределах 15...20 мм, часть энергии пули, которая расходуется на работу деформации купола шлема, меньше, чем в том случае, когда внутренней объем шлема свободен. Соответственно, при этом большая часть энергии может расходоваться непосредственно на пробитие его защитной структуры.

При испытании металлической бронезащиты и особенно керамических материалов также не безразлично, в каких условиях находится тыльная поверхность защиты, влияющая на характер ударно-волновых процессов, происходящих в процессе взаимодействия пули с бронезащитой. При испытании фрагментов защиты бронетехники они, как правило, опираются на деревянные или металлические бруски таким образом, чтобы в месте попадания пули тыльная поверхность была свободна.

Массово-габаритные характеристики манекенов, которые определяют инерцию манекена в процессе ударного нагружения, важны также при испытании мягких элементов бронежилетов, предназначенных для защиты от действия холодного оружия. Скорость нагружения при воздействии холодным оружием, составляющая несколько метров в секунду, и энергия удара, составляющая 40...80 Дж, существенно меньше, чем при воздействии огнестрельного оружия.

На рис.11.39. приведена фотография стенда, предназначенного для испытания различных видов защиты от холодного оружия или других ударных предметов (прут, лопата, пика и др.).

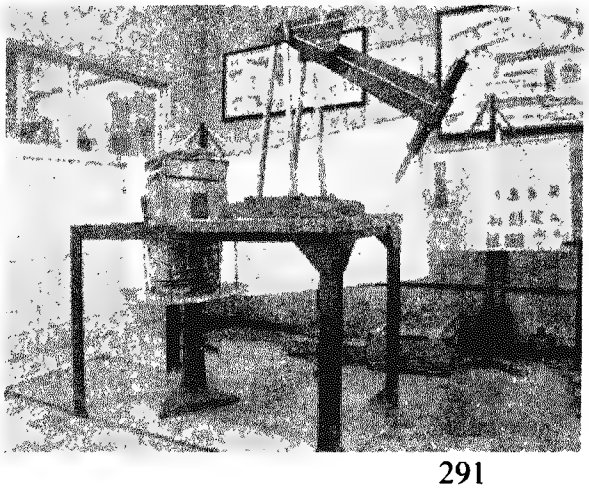


Рис.11.39. Стенд типа маятникового копра для испытаний защиты от действия холодного оружия.

Особенностью стенда является то, что манекен, на который устанавливается защита, качающийся и имеет, как и человек, возможность отклоняться под действием удара.

Таким образом, условия установки или закрепления образцов при проведении динамических испытаний имеют существенное значение.

ЛИТЕРАТУРА

11.1. ГОСТ Р 50774-95. Бронеодежда. Классификация и общие технические требования.

11.2. NIJ-Standard-0101.04. Баллистические характеристики средств индивидуальной защиты. Стандарт Национального института юстиции США, 2000.

11.3. ГОСТ Р 51112-97. Средства защитные банковские. Требования по пулестойкости и методы испытаний.

11.4. ГОСТ Р 51136-98. Стекла защитные многослойные. Общие технические требования.

11.5. ГОСТ Р 51072-97. Двери защитные. Общие требования и методы испытаний на устойчивость к взлому и пулеустойчивость.

11.6. ГОСТ Р 50941-96. Кабина защитная. Общие технические требования и методы испытаний.

11.7. ГОСТ Р 50963-96. Защита броневая специальных автомобилей. Общие технические требования.

11.8. Г.Д. Саламандра Фотографические методы исследования быстропротекающих процессов. М.: Наука. 1974.

11.9. Таблицы стрельбы по наземным целям из стрелкового оружия калибров 5,45 и 7,62 мм. ТС/ГРАУ №61. Москва, 1993.

11.10. А.А. Дмитриевский Внешняя баллистика. Издательство «Машиностроение», М. 1972.

11.11. Ю.А. Ведерников, Ю.С.Худяков, А.И. Омелаев. Баллистика от стрел до ракет. Новосибирск. 1995.

11.12. Jane's Ammunition Handbook. 1993-94

11.13. MIL –C-44050 A. Стандарт США по осколочному имитатору калибров .22, .30, .50 и 20мм.

11.14. А.И. Егоров, В.М. Макушкин, В.М. Маринин, И.А. Поляков Экспериментальное определение величины падения на траектории скорости стального шарика диаметром 6,3 мм. Чет-

вертая Всероссийская научно практическая конференция «Актуальные проблемы защиты и безопасности», С-Петербург, 2001 г.
11.15. США MIL –STD-662F Department of Defense. Test method standard. V_{50} ballistic test for armor. 1997.
11.16. Kenubuehl B.P. Head of Defence Technology Service, Defence Procurement Agency Weapon Systems and Ammunition Test Center CH-3602 Thun, Switzerland. Personal Armour System Symposium 96.
11.17. США MIL A-12560F (MR) 13 June1983
11.18. С.Н.Высоковский, В.А.Григорян, В.М.Маринин, и др. Вероятностно-статистический метод определения 50-процентного баллистического предела стойкости защитных преград. Боеприпасы, №3, 2000 г.
11.19. С.Н.Высоковский, В.А.Григорян, В.М.Маринин, и др. Вероятностно-статистический метод определения 50-процентного баллистического предела стойкости защитных преград. Актуальные проблемы защиты и безопасности. Третья научно-практическая конференция. НПО Спецматериалов, С-Петербург, 2000 г
11.20. А.И.Егоров, В.М.Маринин. Вероятностный метод определения защитных характеристик средств индивидуальной защиты при воздействии боевого стрелкового оружия. Вопросы оборонной техники, сер. 15, вып. 1–2, 2003. с. 41-43
11.21. Вентцель Е.С. Теория вероятности. 1962.
11.22. С. Уилкс. Математическая статистика. Наука. 1967.
11.23. Г.Г. Абезгаус, А.П. Тронь, Ю.Н. Копенкин, И.А. Корвина. Справочник по вероятностным расчетам. Военное издательство МО СССР. М. 1970.
11.24. Григорян В.А., Дашевская О.Б., Егоров А.И., Лаврова И.П., Макушкин В.М., Маринин В.М., Поляков И.А., Хромушин В.А. Влияние условий испытаний тканевых материалов на точность определения баллистического предела V50. Актуальные проблемы защиты и безопасности. Пятая всероссийская научно-практическая конференция. Тезисы докладов. С-Петербург. НПО Спецматериалов 2002. С42-43
11.25. В.М.Маринин, В.А.Хромушин Определение характеристик энергоемкости защитных конструкций на основе текстиль-

ной брони при баллистическом ударе. Международная конференция «VII Харитоновские тематические научные чтения». Саров, 2005. Сборник тезисов докладов, с. 239-241.

11.26. A.I.Jegorow, W,M.Marinin, W.A. Chromusin, "Metoda probabilistyczna okreslania wskaznikow chfrakterystyk ochronnych srodkow ochrony osobistej podczas oddzialywania bojowej broni strzeleckiej", Techniczne Wyroby Wlokiennicze, volume XI, No. 1-2, 2003. s. 44-47.Poland, Lodz.

11.27. В.А.Григорян, В.М. Маринин, В.А.Хромушин. Два способа определения баллистического предела стойкости средств индивидуальной защиты. Techniczne Wyroby Wlokiennicze, volume XII, No. 1-2, 2004. s. 27-31.Poland, Lodz.

11.28. W.A.Grigorian, W.M.Marinin, W.A.Chromuszyn, "Dwa sposoby okreslenia granicy odpornosci balistycznej indywidualnych srodkow ochrony", Techniczne Wyroby Wlokiennicze, volume XII, No. 1-2, 2004. s. 27-31.Poland, Lodz.

11.29. В.А. Григорян, В.М. Маринин, В.А.Хромушин. Расчетная оценка противоосколочной стойкости тканевых защитных структур на основе характеристик энергоемкости. Тезисы докладов VIII международной конференции «Новейшие тенденции в области конструирования и применения баллистических материалов и средств защиты». Г. Хотьково, Московской обл. 2005.

Глава 12.ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ БРОНЕЖИЛЕТОВ

Бронежилет является элементом одежды, поэтому, кроме защитных, он несет в себе и целый ряд других функций, присущих одежде. Он, как и любая одежда, должен быть удобным, комфортным, не сковывать движений, обладать определенными эксплуатационными и эргономическими характеристиками. Как правило, эти характеристики находятся в противоречии с требованиями к защите, поэтому проектирование бронежилета всегда связано с поиском оптимального сочетания всех перечисленных параметров. Игнорирование этого постулата приводит к существенному снижению боевых возможностей бойца, одетого в бронежилет. Так, война во Вьетнаме показала, что даже легкие противоосколочные бронежилеты типа М69 (США) из-за отсутствия в них терморегуляции при интенсивной эксплуатации приводили к перегреву организма бойца, вплоть до получения тепловых ударов и, как следствие, к снижению его боевых возможностей. То же самое выявила и война в Афганистане, где бойцы отказывались надевать тяжелые противопульные бронежилеты типа 6Б3Т, 6Б4 и 6Б5, поскольку они приводили к быстрой утомляемости и перегреву.

Поэтому эргономические и физиолого-гигиенические характеристики конструкции бронежилета как элемента одежды не в меньшей степени, чем характеристики его защищающей способности, влияют на конечную оценку качества бронежилета. Методология проектирования бронежилетов, выработанная в НИИ стали, представлена блок-схемой, приведенной на рис. 12.1. Эта методология основана на системном анализе средств поражения, объектов защиты и защитных бронеструктур и позволяет находить оптимальные решения еще на этапе проектирования, а не в процессе длительной эксплуатации бронежилетов.

Конструкция бронежилета постоянно развивается и совершенствуется, адаптируясь к действующим условиям.

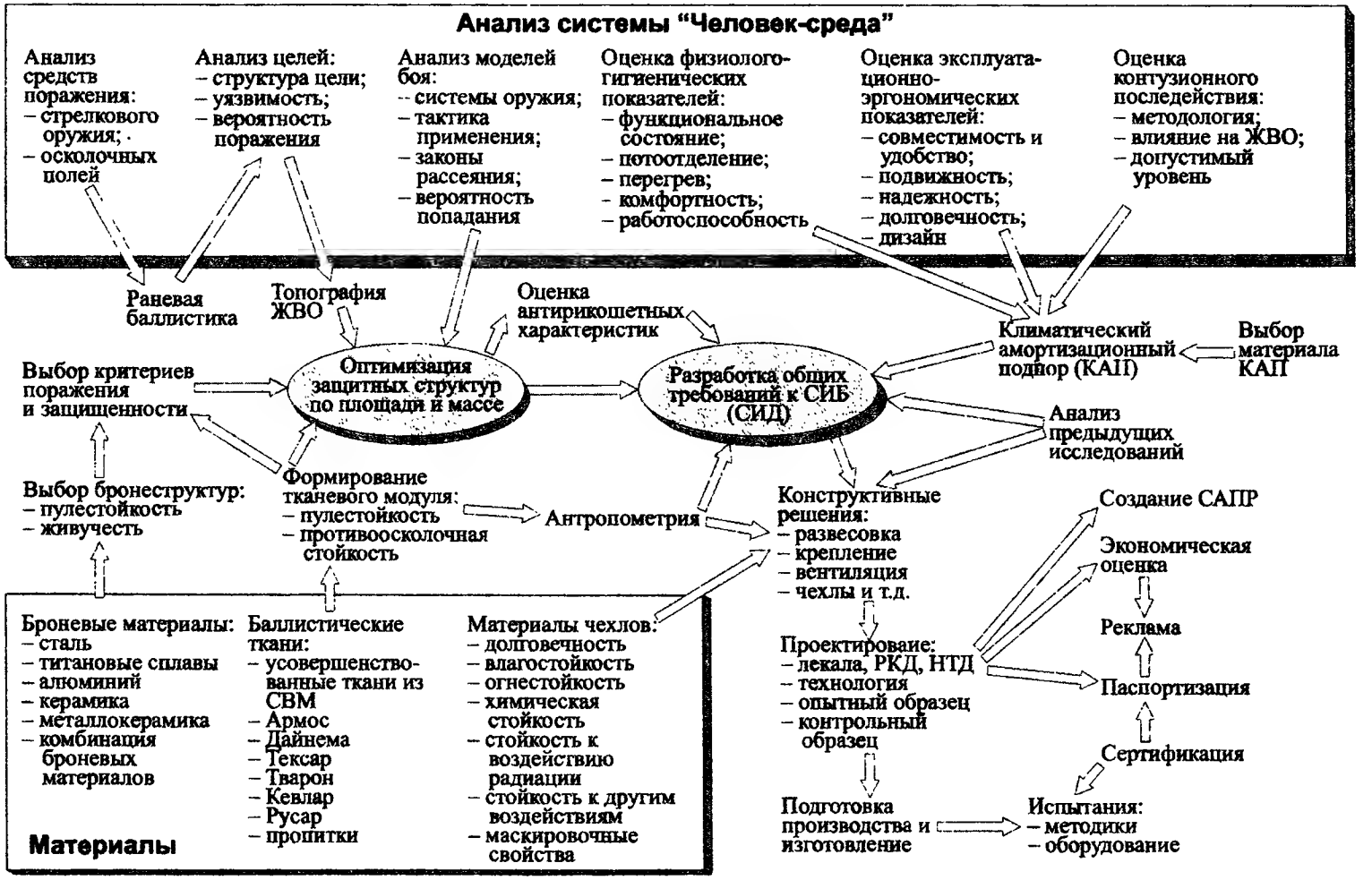


Рис. 12.1 Методология проектирования СИБ

Так, бронежилеты первых поколений (к ним относятся отечественные бронежилеты ЖЗТ-71, ЖЗЛ-74, 6Б1, 6Б2, 6Б3Т, 6Б3ТМ, 6Б4 и 6Б5) имели большую площадь защиты 50...60 дм^2, которая обеспечивалась так называемой «черепичной» или «чешуйчатой» бронезащитой, где использовалось большое количество (до 50 шт.) металлических или керамических бронеэлементов небольшого размера (90...135)×(100...135) мм, размещаемых в карманах с некоторым перекрытием (рис. 12.2).

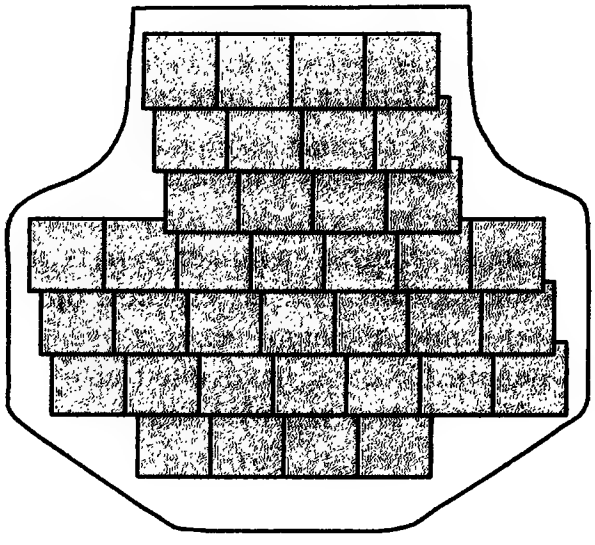


Рис. 12.2. Размещение бронеэлементов в кармане бронежилета

Основные недостатки конструкции этих бронежилетов сводились к следующим:

– отсутствие системы терморегуляции;

– отсутствие дифференцирования уровней в защите;

– отсутствие забронёвого амортизатора, снижающего уровень запреградной травмы;

– отсутствие антирикошетного слоя, задерживающего вторичные осколки, образующиеся при ударе пули;

– отсутствие систем, перераспределяющих массу бронежилета с плеч на пояс;

– отсутствие водоотталкивающих пропиток или систем защиты тканевого пакета от намокания;

– значительная «паразитная» масса из-за большого количества перекрытий соседних бронеэлементов;

– высокая вероятность так называемого «подныра» пули в стыки между бронеэлементами, особенно при обстреле под углами.

Все перечисленные недостатки в большей или меньшей степени были устранены в бронежилетах следующих поколений, когда у разработчиков накопился достаточный опыт практической эксплуатации СИБ, в том числе и в боевых условиях.

Остановимся подробнее на основных конструктивных характеристиках бронежилетов и рассмотрим, как они реализуются в настоящее время.

12.1 Площадь защиты

В большинстве бронежилетов площадь защиты составляет не более 30...40 дм^2 (в армейских – 45...49 дм^2). Практикой доказано, что увеличение площади защиты начинает влиять на подвижность и обостряет проблемы, связанные с перегревом организма человека. Кроме того, увеличение площади ведет к увеличению веса защиты и жилета в целом. Сегодня пехотинец вынужден носить на себе в среднем 30...35 кг. В стандартную экипировку входят [12.1]:

– одежда, белье, кепка, ремень, ботинки – 4,5 кг;

– бронежилет и шлем – 9,5...10,5 кг;

– снаряжение (транспортный жилет) – 1,8...2,0 кг;

– инженерные средства (лопата) – 1,0...1,1 кг;

– средства индивидуальной защиты от оружия массового поражения (противогаз + индивидуальный дегазационный пакет + индивидуальный противохимический пакет) – 1,5 кг;

– котелок, продовольствие – 1,1 кг;

– медицинские средства (индивидуальный перевязочный пакет + аптечка индивидуальная + жгут) – 0,4 кг;

– комплекс выживания – 0,4 кг;

– индивидуальная радиостанция – 0,6 кг;

– средства разведки и наблюдения – 0,1 кг.

Американские солдаты в Ираке обеспечиваются экипировкой весом до 48 кг [12.2].

Анализ, проведенный экспертами США показал, что пехотинец для сохранения боеспособности не должен носить на себе ношу, большую 20% собственного веса. Получается, что вес всей его

экипировки не должен превышать 16...20 кг. Если отсюда вычесть вес оружия, других необходимых элементов экипировки (паек, аптечка, рация, приборы наблюдения и т.д.), то на защиту и бронежилет, в частности, остается не более 5...6 кг. Задав максимальный уровень защиты, например, 6а по ГОСТ и выбрав оптимальную защитную структуру для данного уровня, поверхностная плотность которой находится в пределах 500...550 г/дм^2, находим, что площадь защиты не может превышать 10...12 дм^2, что конечно, недостаточно, поскольку закрывает лишь 5 % поверхности человеческого тела.. Если же исходить из принципа обеспечения защиты от наиболее вероятного средства поражения, то картина меняется. Многочисленные литературные данные по анализу потерь на поле боя в различных военных конфликтах дают следующую картину распределения средств поражения [12.1]:

– осколки – более 60%, причем масса большей части осколков не превышает 1 г, а их скорость – 520...600 м/с;

– высокоскоростные пули – до 25%;

– низкоскоростные пули до 5%;

– другие поражающие факторы (ударная волна и т.д.) – до 10 %.

Осколочные ранения в армии США во время войны в Корее составляли примерно 73%, во Вьетнаме – 84%. По итогам проведения антитеррористических операций на Северном Кавказе (1999-2001 гг.) осколочные ранения составляли 64,4% [12.2]. Таким образом, наиболее вероятным средством поражения на поле боя являются осколки. Поверхностная плотность защитной структуры, обеспечивающей защиту от осколка массой 1 г летящего со скоростью 550 м/с, составляет 30...40 г/дм^2. В этом случае приведенной защитной структурой можно обеспечить защиту 140...150 дм^2 поверхности человеческого тела, что уже составляет половину всей площади. Но при этом боец будет абсолютно незащищен от почти 40% средств поражения. Выход из положения разработчики нашли в применении принципа дифференцирования защиты.

12.2. Дифференцирование защиты

Дифференцирование защиты по уровням – мера, с помощью которой можно снизить массу защиты без существенного снижения

ее эффективности. Этот принцип, реализованный в бронетанковой технике, сегодня с успехом применяется и в СИБ. Дифференцирование в защите бронежилетов заключается в обеспечении достаточного уровня по всей площади и максимально возможного уровня по площади, защищающей так называемые жизненно важные органы (ЖВО). Площадь ЖВО в современных бронежилетах не превышает 6...10 дм^2 по грудной проекции и столько же по спине. Иногда в бронежилетах используются структуры нескольких уровней защиты (например, «БЖ-СН» или «Вызов-М»). Под достаточным уровнем здесь понимается уровень, обеспечивающий защиту от наиболее массового или наиболее вероятного вида средств поражения. Если проследить тенденции развития могущества стрелкового вооружения и учесть рост защитных характеристик существующих и перспективных броневых материалов, то легко оценить, как меняется величина площади защиты с годами (рис. 12.3). Расчёты, а главное, и статистика показывают, что такое уменьшение общей и усиленной площадей защиты незначительно влияет на вероятностные характеристики поражения бойца.

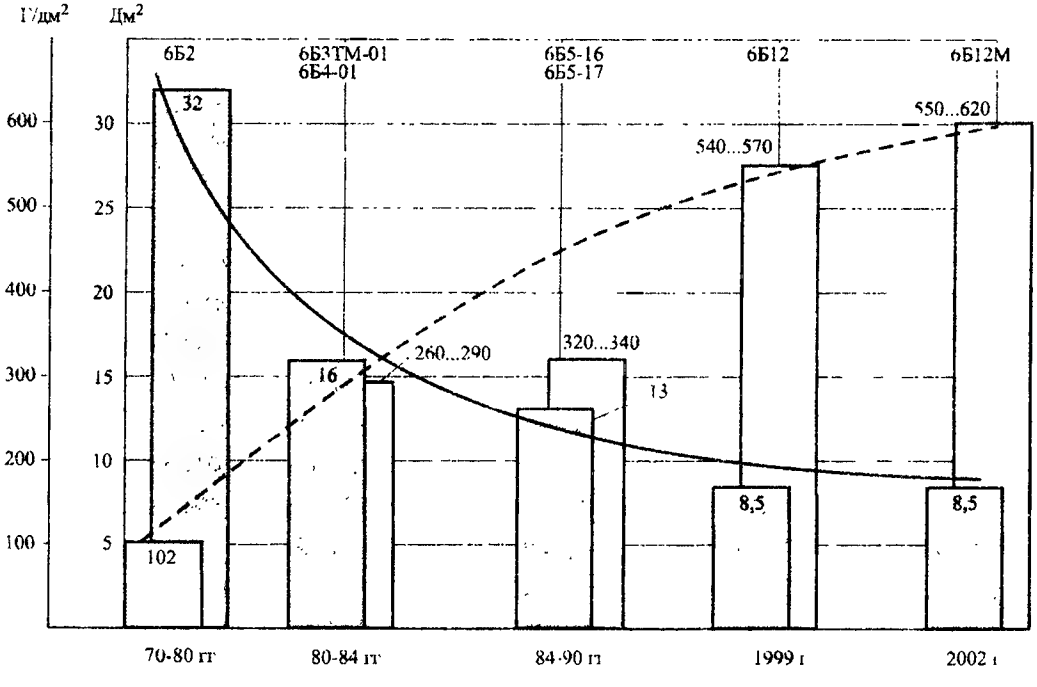


Рис. 12.3. Изменение характеристик СИБ: ——— площадь защиты; – – – поверхностная плотность защитной структуры.

12.3. Минимизация количества бронеэлементов

Идея минимизации количества бронеэлементов защиты явилась следствием уменьшения площади защиты. Общая площадь защиты, как правило, обеспечивается «мягкими» структурами, а защита ЖВО – одним или двумя-тремя жесткими бронеэлементами. Использование одной монопанели даже небольшой площади (6...8 дм^2) при кажущемся преимуществе по сравнению с «черепичной» схемой (отсутствие стыков между панелями, снижение паразитной массы из-за перекрытий панелей) на практике имеет и свои отрицательные стороны. Основные из них – это существенное снижение подвижности и как следствие – снижение скрытности ношения бронежилета. При увеличении площади монопанели до 10 дм^2 эти проблемы еще более возрастают. Одно из решений – использование 2-3 бронепанелей, имеющих возможность некоторого перемещения относительно друг друга. Такая схема впервые была использована в бронежилетах типа «Визит-М» и «БЖСН» (1982 г.). Время доказало ее эффективность. Сегодня практически все общеармейские и штурмовые бронежилеты (6Б12, 6Б13, 6Б23, «Вызов», УБЖ), многие коммерческие бронежилеты проектируются на основе данной схемы построения бронезащиты. В качестве иллюстрации на рис. 12.4 представлена схема защиты бронекомплекта «Вызов».

12.4. Система терморегуляции

Система терморегуляции становится неотъемлемой частью любого бронежилета. Она может быть выполнена в пассивном (когда конструктивными приемами обеспечивается естественная вентиляция поджилетного пространства), либо в активном варианте (когда в бронежилет встроена система принудительной терморегуляции). Простейшими пассивными системами терморегуляции являются различные влагопоглощающие или сетчатые майки, надеваемые под бронежилет, специальные поджилетные климатические амортизационные подпоры (КАП) с продольными каналами для естественной циркуляции воздуха. К пассивным мерам относятся и различные отверстия, прорези в чехлах и т.д. На практике в большинстве ситуаций таких мер оказывается достаточно, чтобы обес-

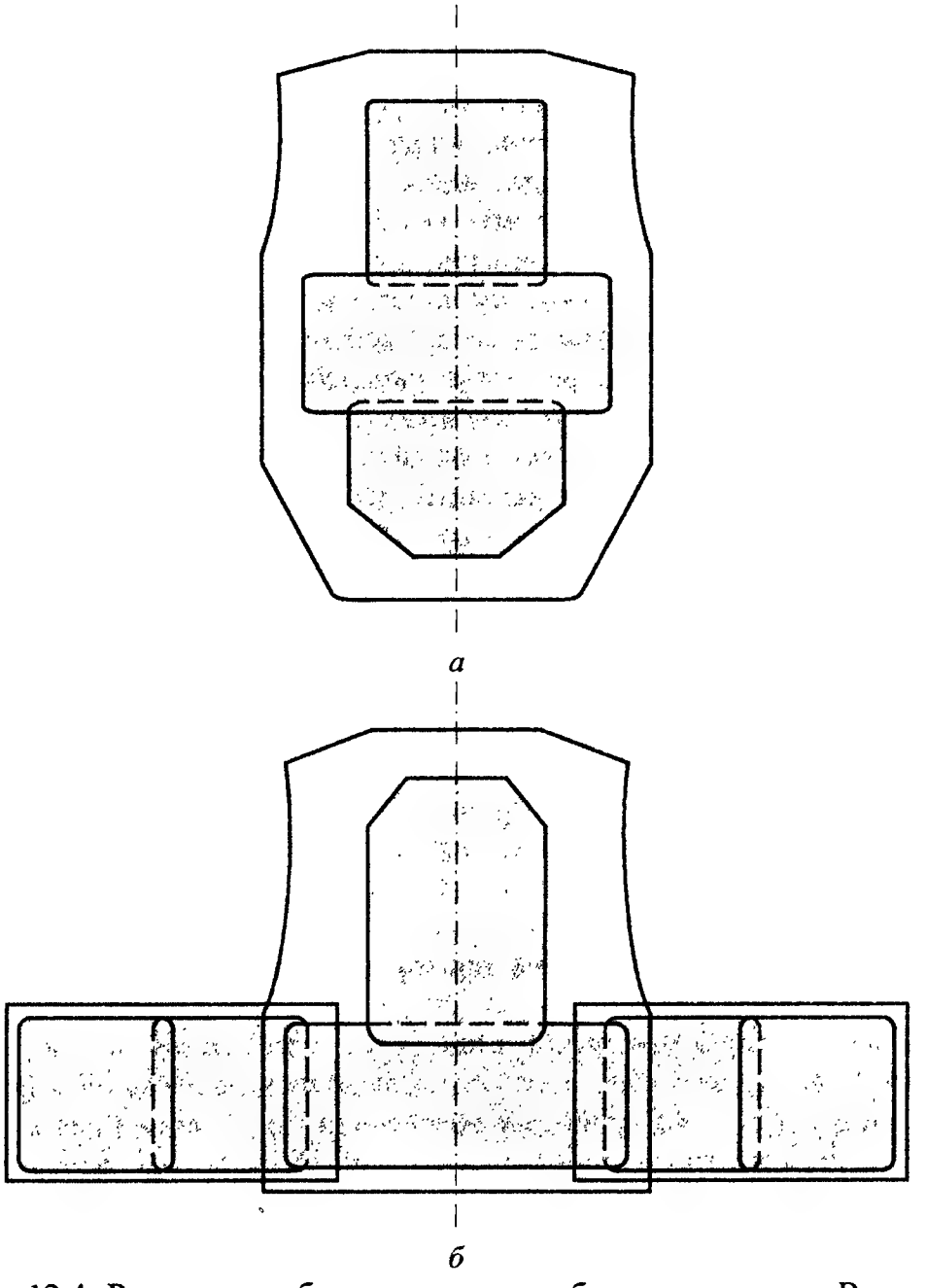


Рис. 12.4. Размещение бронеэлементов в бронекомплекте «Вызов»: *а* – перед, *б* – спина

печить необходимый температурный баланс. Однако в жестких климатических условиях (большая влажность, высокие температуры, необходимость длительной эксплуатации) приходится использовать активные способы терморегуляции. На сегодня существует несколько способов, позволяющих обеспечить необходимый тепловой баланс, однако все они пока не получили широкого распространения из-за превышения ограничений по массово-габаритным параметрам.

Все активные системы терморегулирования можно разбить на 2 группы: системы вентилирования и системы теплоотвода. Системы вентилирования обеспечивают необходимые температурные условия за счет принудительного циркулирования воздуха между телом и бронежилетом с помощью, например, электровентилятора. Системы теплоотвода поглощают тепло непосредственно с кожи посредством циркуляции охлаждающего реагента внутри бронежилета. Оба типа имеют свои преимущества и недостатки. Системы первого типа требуют внешнего источника энергии. В большинстве случаев – это обычные электрические аккумуляторные батареи. Системы второго типа, как правило, строятся на поглощении энергии в результате фазовых превращений, происходящих в веществе (таяние льда, расплав парафина и т.д.). Эти системы имеют ограниченное время действия, не превышающее, как правило, двух-трех часов. Кроме того, все активные системы имеют достаточно большие веса – 2...4 кг. В последнее время делаются попытки применить в системах терморегулирования так называемые элементы Пельтье, в которых проходящий электрический ток нагревает одну поверхность и охлаждает другую. Однако КПД таких систем крайне низок – не превышает 10%. По расчетам, для того чтобы обеспечить эффективный отвод тепла от тела человека, выполняющего тяжелую физическую работу, при которой по оценкам [12.3] мощность тепловыделения составляет не менее 440 Вт, потребуется источник энергии размером около 7,5 л. и массой 27 кг. При этом энергии батареи хватит не более чем на полчаса работы.

Многие зарубежные фирмы ведут интенсивные работы по поиску приемлемых решений проблемы терморегуляции. Пример такой системы разработки фирмы TPI приведен на рис. 12.5. [12.4]. Система состоит из специального костюма с встроенными теплообменниками, по которым циркулирует холодная вода. Вода в виде

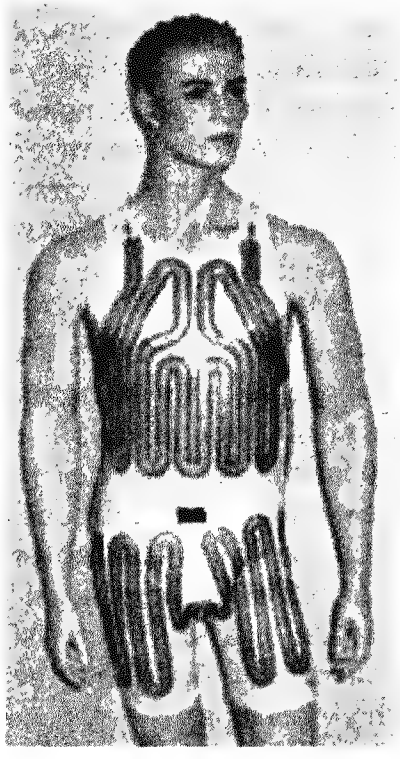


Рис. 12.5. Система терморегуляции фирмы TPI

льда хранится в мягком наружном пакете объемом 2 литра. Костюм снабжен клапаном с термостатическим управлением, с помощью которого поддерживается постоянная температура тела независимо от нагрузки на организм и внешних условий.

Кроме традиционных путей, прорабатываются и другие. В частности, специальными добавками в пищу создаются условия, когда организм становится нечувствителен к физическим перегрузкам и не выделяет лишнего тепла, ведутся работы по управлению температурой тела с помощью биоэлектронных средств, которые позволяют резко увеличить теплоотдачу через определенные участки тела, например, через ладони. Так или иначе, но проблема терморегуляции является не менее важной и сложной, чем проблема обеспечения необходимой защищенности.

12.5. Запреградная травма

Если сравнивать ГОСТ Р 50744-95 с известными зарубежными стандартами, то он задает самые жесткие требования по забронеевой или контузионной травме, поскольку напрямую увязывает уровень травмы с медико-биологическими последействиями ее воздействия на организм человека. Зарубежные же стандарты оценивают величину травмы по глубине отпечатка на пластилиновой подложке. Этот параметр не дает прямой корреляции с физиологической травмой. Однако проведение испытания на оценку запреградной травмы в строгом соответствии с ГОСТом требует таких больших затрат и такой статистики, что эта процедура на практике используется лишь для некоторых (в основном для армейских) бронежилетов. Все бронежилеты для силовых ведомств и коммерческие

бронежилеты оцениваются по упрощенным методикам, в которых используется, как правило, зарубежный опыт, т.е. оценка травмы по глубине отпечатка. Однако как бы ни задавались эти требования, очевидно одно – без специальных мер по снижению запреградного действия пули бронежилет вряд ли будет отвечать современным требованиям. Простейшей мерой по снижению уровня запреградной травмы является расположение за защитной структурой амортизирующего слоя. В качестве такого слоя используются различные эластичные вспененные полимеры, войлок. За рубежом для этих целей часто используют специальные антитравматические металлические вставки из нержавеющей стали, поликарбоната, делаются попытки снизить травму использованием более жестких тканевых структур. Учитывая все возрастающую энергетику пуль стрелкового оружия, проблема обеспечения необходимого уровня запреградной травмы становится по сложности такой же, как и проблема обеспечения необходимой стойкости защиты. Для эффективного решения данной проблемы в перспективных зарубежных проектах защитную структуру относят от поверхности тела на несколько сантиметров. Однако как реализуется этот проект на практике – пока неясно. На сегодня нет надежных расчетных методик или процедур, которые бы позволяли рассчитать необходимые параметры амортизирующего слоя для данного средства поражения и выбранной защитной структуры. Это хорошо иллюстрируют экспериментальные данные, полученные на некоторых типичных защитных структурах с использованием различных амортизаторов. Так, в табл. 12.1. приведены результаты испытания защитных структур на основе броневого алюминия и тканевой подложки пистолетной пулей FMJ патрона .44 Magnum. В качестве амортизатора использовались пенополиэтилен (ППЭ), поликарбонат (ПКБ), тканевые прессованные слои в различном сочетании [12.5].

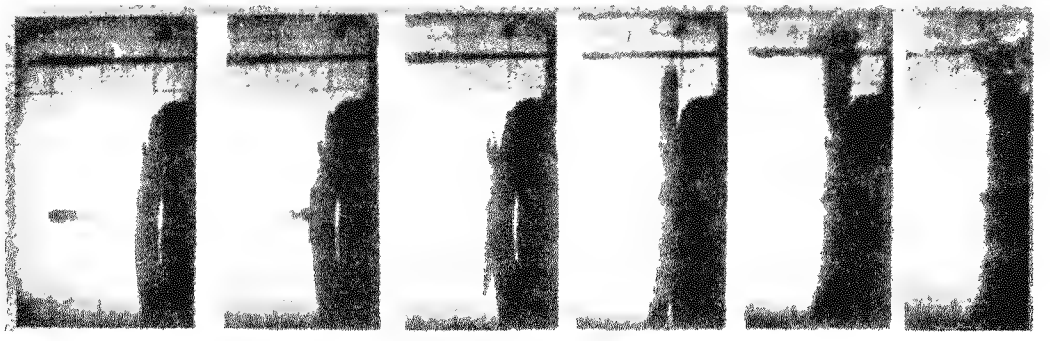
12.6. Антирикошетный слой

На рис.12.6. показаны рентгенограммы испытаний защитной структуры без антирикошетного слоя (сверху) и с антирикошетным слоем (снизу). Выход вторичных мелких осколков фиксируется специальным алюминиевым экраном-свидетелем толщиной 1 мм

Таблица 12.1

Влияние конструкции защитной структур на уровень запреградной травмы

№№ п/п	Структура			$v_{уд}$, м/с	Размер отпечатка, (h×∅), мм
	Бронеэлемент	Подпор	Амортизатор		
1	3,5 мм АБТ (НВ=156)	16 слоев тип А	8 мм ППЭ + (7+6) слоев тип А (спрессованный) + 8 мм ППЭ	418	15×55
2	3,5 мм АБТ (НВ=156)	2х7слоев тип А (спрессованный)	2×6 слоев тип А (спрессованый) + 4 мм ППЭ	420	20×60
3	3,5 мм АБТ (НВ=156)	16 слоев СТ 709	8 мм ППЭ + 2 мм ПКБ+4 мм слоя ППЭ	439	21×44
4	3,5мм АБТ (НВ=156)	16 слоев СТ 709	8 мм ППЭ + 2 мм ПКБ	432	36×82
5	3,5мм АБТ (НВ=156)	16 слоев СТ 709	20 мм поролон	424	46×67
6	3,5мм АБТ (НВ=156)	8 слоев К770 S	8 мм ППЭ + (1 слой СТ716 + 2×4 мм ППЭ + 1 слой СТ716) (10×10) 4 мм ППЭ + 7 слоев тип А (спрессованный) + 4 мм ППЭ	436	30×80
7	3,5мм АБТ (НВ=156)	8 слоев К770 S	4 мм ППЭ+7 слоев тип А (спрессованный)+4 мм ППЭ	420	45×60
8	3,5мм АБТ (НВ=156)	8 слоев К770 S	10 мм ППЭ	401	20×60
9	3,5мм АБТ (НВ=156)	10 слоев СТ 709	8 мм ППЭ + 7 слоев тип А (спрессованный) + 10мм ППЭ	416	26×54
10	3 мм АБТ (НВ=129)	10 слоев СТ 709	8 мм ППЭ + 7 слоев тип А (спрессованный) + 8 мм ППЭ	424	27х76
11	2,6 мм АБТ	16 слоев СТ 709	8 мм ППЭ+(6+6) слоев тип А (спрессованный)	422	20х87



а

б

Рис. 12.6. Рентгенограммы испытаний защитной структуры без антирикошетного слоя (*а*) и с антирикошетным слоем (*б*)

(расположен горизонтально сверху). Хорошо видно как на верхних снимках осколки выходят из защитной структуры и пробивают алюминиевый экран. Мощность потока вторичных осколков возрастает с ростом энергии пули. Так, если в качестве антирикошетного слоя использовать несколько слоев баллистической ткани, то при попадании в защитную структуру, например, пули пистолета ТТ, достаточно 5-6 слоев ткани СВМ арт.56319, чтобы исключить выход вторичных осколков за пределы защитной структуры. Если в броне-элемент попадает обычная пуля автомата АКМ, то вторичные осколки удерживаются уже 12 слоями этой ткани, а если обстрел ведется пулей ЛПС из СВД или пулей ТУС к АКМ, то кинетическая энергия вторичных осколков такова, что не хватает и 24 слоев ткани. Все это говорит о том, что проблема антирикошета – достаточно серьезная техническая проблема, требующая соответствующих конструкторских решений. Одно из простейших решений, позволяющих создать эффективный антирикошетный слой из минимального числа слоев

баллистической ткани, – это применение гофрированного тканевого слоя. При этом вторичные осколки пробивают один и тот же слой ткани несколько раз. Другое решение – использование противоосколочного воротника, который отсекает поток осколков, летящих в голову. Однако это решение непригодно для жилетов скрытого ношения. Еще один способ гасить вторичные осколки – использовать бронеэлементы из вязких материалов, например из прессованных нетканых структур, алюминия и других броневых материалов, не дробящих пулю и не образующих вторичные осколки. Одним из перспективных решений может стать использование разнесенных бронепреград, которые уже начинают использоваться в бронежилетах.

12.7. Рациональное распределение массы бронежилета

Медициной установлено, что плечи являются тем чувствительным датчиком, который выдает организму информацию о весовой перегрузке. Разработчики первых отечественных и зарубежных бронежилетов игнорировали этот факт и конструировали бронежилеты, вся масса которых, включая и элементы личной экипировки, повисала на плечах солдата. Проведенный в одной из войсковых частей эксперимент показал, что после преодоления стандартной полосы препятствий боец в таком бронежилете чувствовал на себе массу в 1,4...1,7 раза превышающую реальную массу бронежилета. Такие же эксперименты с бронежилетами, имеющими рациональное распределение веса по телу бойцов, давали иной результат. Бойцы после преодоления полосы препятствий оценивали вес бронежилета на 30...40 % меньше его реальной массы. Рациональное распределение веса бронежилета достигалось закреплением с помощью специального пояса задней части бронежилета на талии, при этом существенно снижалась нагрузка на плечевой пояс. Это простейшее решение, но оно позволило существенно снизить кажущуюся массу бронежилета, которая является одним из главных факторов, влияющим на утомляемость бойца. Другим правилом рационального перераспределения массы является размещение элементов личного снаряжения таким образом, чтобы их масса не передавалась на плечи. Как правило, для этой цели используются пояс, бедра. В настоящее время за рубежом активно ведутся работы

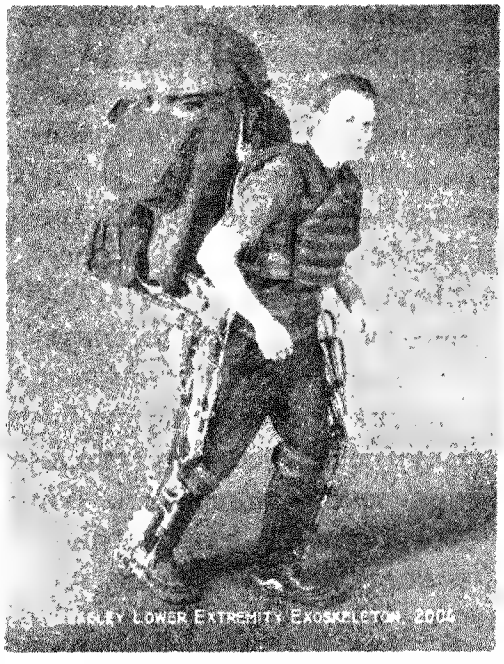


Рис. 12.7. Опытная модель экзоскелетона для ног

по созданию так называемых экзоскелетонов – устройств, позволяющих многократно усилить мышечную энергию человека [12.6-12.8]. На рис. 12.7 приведена опытная модель экзоскелетона, разработанная Berkeley Robotics and Human Engineering Laboratory. Однако до их реализации пока далеко.

12.8. Защита тканевого пакета от намокания

В бронежилетах первых поколений эта проблема решалась применением герметичных чехлов, в которые помещались баллистические тканевые пакеты. Эти чехлы изготавливались из синтетических водонепроницаемых пленок или специально обработанных тканей. Однако надежность такого способа защиты была невысока. При любом повреждении защитного чехла, опасность намокания баллистического пакета резко возрастала, а это приводило к снижению его баллистических характеристик. Сейчас существует масса гидрофобных пропиток, которые, не снижая баллистических характеристик ткани, обеспечивают ее надежную защиту от намокания. Кроме того, проблему можно решить, используя гидрофобные баллистические ткани, например, из высокомодульных полиэтиленовых волокон. В любом случае сегодня эта проблема решается достаточно просто.

12.9. Рациональная защитная структура

Рассчитать или экспериментально найти оптимальную защитную структуру от конкретного средства поражения – задача непростая, но реальная. Гораздо сложнее найти оптимальную защитную структуру от комплекса средств поражения. Это наглядно показано

в главе 11 (рис 11.1), где даже для одного средства поражения – стандартного осколка – при изменении скорости взаимодействия с тканевой преградой разные ткани ведут себя по-разному. Стальные преграды из ультравысокопрочной стали марки 56, хорошо работающие против термоупрочненных пуль повышенной бронепробиваемости, практически не дают выигрыша в сравнении с традиционными противопульными сталями при обстреле высокоскоростными свинцовыми пулями М193 к винтовке М16А1. Пуля 7Н24 с карбидовольфрамовым сердечником не пробивает разнесенную преграду, суммарная поверхностная плотность которой намного ниже, чем поверхностная плотность гомогенной преграды, пробиваемой этой пулей. Сегодня, поскольку не существует сколь-нибудь надежного расчетного или эмпирического аппарата, выбор оптимальной защитной структуры – это искусство разработчика. Но даже если такая оптимальная защитная структура найдена, всегда остается проблема следующего шага – как эту структуру вписать в конструкцию бронежилета и уложиться в заданные эргономические, эксплуатационные и другие требования. Ярким примером служат прессованные структуры из высокомодульного полиэтилена, которые дают почти двукратный выигрыш по поверхностной плотности в сравнении со сталями в широком диапазоне средств поражения. Однако значительная толщина (до 25 мм) делает их фактически непригодными, например, для бронежилетов скрытого ношения. Броневые алюминиевые сплавы, показывающие существенные преимущества перед сталью во 2 классе ГОСТ, в реальных конструкциях бронежилетов эти преимущества постепенно утрачивает. В таблице 12.2 приведены весовые характеристики элементов конструкции двух бронежилетов 2 класса защиты с алюминиевыми («Визит-МА») и стальными («Визит-М») бронепанелями и видно, где весовые преимущества, полученные на алюминиевой бронепанели, практически исчезают [12.5].

Во-первых, для броневых алюминиевых сплавов требуется более мощный амортизирующий пакет, чтобы снизить до допустимого уровень запреградной травмы. Во-вторых, для них необходим более надежный тыльный тканевый подпор, поскольку, в отличие от стальной бронепанели, алюминиевая панель пробивается и защиту обеспечивает вся структура. В-третьих, не следует забывать про уве-

личение габарита защитной структуры из алюминиевого сплава и повышение цены бронежилета.

Таблица 12.2

Массовые характеристики бронежилетов «Визит-МА», «Визит-М» и их составляющих

№№ п/п	Наименования	Масса составляющих, г			
		«Визит-МА» (с алюминием)		«Визит-М» (сталь 44)	
		грудь	спина	грудь	спина
1	чехол	107	130	–	–
2	КАП	105	90	–	–
3	чехол + КАП	212	220	145	180
4	тканевый модуль	630	560	560	480
5	бронеэлемент (верхний)	287	289	640	640
6	бронеэлемент (нижний)	329	307	640…713	680…702
7	вставка (амортизатор)	160	200	–	–
8	секция	1618	1576	1985…2052	2002
9	бронежилет	3200		3975….4060	

12.10. Эксплуатационные параметры

В зависимости от решаемых задач перечень эксплуатационных требований, предъявляемых к бронежилетам, может достаточно сильно различаться. Почти сорокалетняя практика эксплуатации бронежилетов позволила выделить наиболее существенные требования, список которых приводится ниже:

– чехол бронежилета должен легко отделяться от защитной структуры для его чистки, ремонта или замены;

– конструкция защиты должна быть выполнена с использованием модульного принципа, при котором изменение требуемого уровня защиты может достигаться простой заменой унифицированных бронеэлементов;

– для размещения элементов личной экипировки преимущественно должен использоваться так называемый транспортный жилет, который легко трансформируется в соответствии с боевыми задачами. Карманы непосредственно на внешнем чехле допускаются как исключение;

– внешний чехол должен быть изготовлен из износостойкой огнестойкой и экологически чистой ткани, стойкой к ГСМ;

– конструкция фиксаторов бронежилета на туловище должна позволять достаточный диапазон регулировок по фигуре и обеспечивать быстрое надевание и снимание бронежилета;

– внешний чехол не должен набирать влагу и должен позволять быстро стекать проникшей воде;

– бронежилет не должен снижать боевые возможности бойца (мешать ему стрелять, выполнять другие действия) и должен сочетаться с другими элементами экипировки (шлем, оружие и т.д.);

– бронежилет должен защищать от огня, климатических воздействий, обнаружения приборами разведки, работающими в различных диапазонах электромагнитного спектра.

Таким образом, бронежилет – это не просто рационально выбранная защитная структура, обеспечивающая заданный уровень защитных характеристик, а система, которая должна оптимизировать множество защитных, эргономических, эксплуатационных, медико-биологических параметров.

ЛИТЕРАТУРА:

12.1. В.А. Григорян, А.И. Егоров, В.А. Хромушин, О.Б. Дашевская Перспективы создания современной экипировки, Труды научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности», С.–Петербург, НПО Спецматериалов, 2002 г.

12.2. В.А. Кормушин, А.С. Каменских, С.В. Ожгибесов, М.В. Осыко, к.т.н. В.С. Коннов, к.т.н. Н.М. Дудченко Перспективы развития боевых защитных комплектов военнослужащих, Труды 9 научно-практической конференции «Новейшие тенденции в области индивидуальной бронезащиты», Москва, НИИ Стали, 2007 г.

12.3. С.В.Ожгибесов и др. «Система терморегулирования в перспективной экипировке военнослужащего», Труды научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности», С.Петербург, 2001 г.
12.4. «Новые тенденции в области средств индивидуальной защиты пехотинца», http://www.defense-update.com/features/du-2-07/infantry_armor_cooling.htm.
12.5. В.А. Григорян, Э.Н. Петрова, В.В. Прошкин, Е.И. Степанов, С.Ю. Чусов, В.П. Яньков «Разработка в области легких спецматериалов и возможности их использования в СИБ», Труды научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности», С.Петербург, 2005 г.
12.6. http://sanlab.kz.tsukuba.ac.jp/HAL/indexE.html
12.7. http://www.newsru.com/arch/world/11mar2004/super.html.
12.8. http://bleex.me.berkeley.edu/bleex.htm.

Приложение 1

Бронежилеты российских производителей

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
1.НПО «Техника» МВД РФ (НИИСТиС) 111024, г. Москва, ул. Пруд Ключики, д. 2. Тел.: (495) 273-23-80 Факс: (495) 273-31-28 Телетайп: 273-91-11	Зубр	1	3 - 6	3,4 -9,9	54-59	18 (сталь) 15,6 (керамика)	Усиленная защита плечевого пояса, защита паха. Тканевая основа + стальные или керамические (для 6 класса) броневлементы (БЭ).
	Базальт	1	2+3+5	17,4	60	7.8 (2)+ 5,3 (3)+ 22,8 (5)	Для штурмовых операций. Дифференцированная защита. Стальные БЭ
	Базальт - МК	I	6	12	56	12	Композиционные БЭ
	Залом	1	2 5	4,9 -5,6 10,6 - 12,3	38 - 48	17,5 15 - 17,5	Тканевый модуль с дополнительными БЭ
	Кора-Кулон	2 3 5	нет	5,2 - 5,9 8,4 – 10.1 11,7-13,6	21,5 - 25	нет	Стальные БЭ с демпфером и антирикошетным слоем. Тканевый модуль отсутствует.
	Бекас	1	– 2-5	2,4 +5,4 -14,0	46	– 18	Разгрузочный жилет комплектуется стальными БЭ

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Мираж (Мираж-М)	2а 1(руки)	нет	12,0	45	нет	Выполнен в виде куртки с встроенным защитным модулем. Защита тела обеспечивается стальными БЭ 100×100 с перекрытиями в 15 мм, руки – тканью СВМ (16 слоев)
	Кора-1	1	-	2,4	46	нет	Для скрытого ношения. Самый распространенный жилет для МВД
	Кора-1П	1	-	2,7	46	нет	Усиленный вариант бронежилета (БЖ) Кора-1
	Кора-1МК	1	2 - 5	2,6 - 12,3	42 - 53	18	Тканевый модуль + стальные БЭ, принят на снабжение МВД в 2001 г.
	Кора-1МК-СН	1	2 2а	3,1 – 5,6 3,3 – 3,7	35 - 39	15	Скрытого ношения, БЭ алюминиевые или из высокомодульного полиэтилена
	Кора-2	2а	-	6,0	35	нет	Универсальный БЖ
	Кора-2*	1	2 или 3	10 (2кл.) 14 (3кл.)	47	26	Универсальный БЖ

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Кора-3	Спец	нет	3,2	40	нет	Скрытого ношения, для защиты от холодного оружия. В качестве защиты используется стеклопластик или алюминиевые пластины 100×100 мм
	Кора-5	1	-	5,8	56	-	Нет данных
	Грот-3	Нет данных		14,5	Нет данных		Защитный костюм сапера
	Грот-3В	1	2а-5	35,0	180	-	Состоит из жилета Кора-2 (2а класс), шлема (2 класс), куртки и брюк (руки ноги воротник – 1 класс), дополнительно куртка комплектуется БЭ толщиной 2,14…5,6 мм, максимальный уровень защиты - 5 класс по ГОСТ. Комплект обеспечивает защиту от взрыва ПМН с 1 м, Ф1 – с 5 м. Имеет жидкостное охлаждение

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Багарий	1	2-5 + спец.	9,8 (5 кл)	40-42	15	Универсальный бронежилет. Защита от колющего оружия – штык-нож 6Х5 с энергией удара 45 Дж
	Корунд	IIIA по NIJ	2 или 3	3.5 +2.8 - 5,8	55	9	Штурмовой с защитой шеи и паха. Применяется сталь толщиной 2 и 4 мм
	Консул	1	-	2,1	40	нет	Скрытого ношения для VIP, имеет боковую защиту
	Тройка	1	-	2,3	46	нет	Скрытого ношения для VIP
2. Центр высокопрочных материалов «Армоком» 141371,Моск. обл., г. Хотьково, ул. Заводская, ЦНИИСМ тел/факс (495)262-19-81, (49654)3-63-36 armocom@mail.ru, mail@armocom.ru Представительство	СК-А	1	2	1.4 - 3,2	24 - 27	8	Скрытого ношения, чехол из мягких гигроскопичных материалов
	СК-АБ	1	2	1,6 - 3,6	25 - 31	8	Скрытого ношения
	СК-АН	1	2	1,4 - 3,4	22 - 25	8	Скрытого и наружного ношения
	СК-Б СК-2Б	1	2-5	2,5 - 11,9	38 - 42	18	Скрытого и наружного ношения. Может комплектоваться воротником и деталью защиты паха. Дублированная застежка на плечах и боках. 3 варианта исполнения

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
в Москве НТЦ «Информтехника», Орликов пер., д.7 тел.(495)975-83-52	СК-БР	1	2-5	3,2 - 12,6	40 - 44	18	Имеет огнезащитный чехол отличается наличием усиленной защиты боков
	СК-БТ	1 2 3 4 6	– 2 3 4 6	3,2 - 4,2 6,4 - 7,4 9,0 - 10,0 10,7 - 11,7 8,9 - 9,9	59 - 74	– 18 18 18 15	Усиленные противоударные плечи. Съемный воротник и фартук. Для ГАИ, спецслужб, охраны
	СК-Д СК-2Д	2 3 5	-	4,6 7,6 10,2	21,5	нет	Минимальная стоимость, может добавляться боковая защита. Не применяется ткань СВМ
	СК-ДП	2-5	-	5,4 - 11,9	21,5	нет	Аналогичен СК-Д. Имеет более надежную плечевую застежку.
	СК-И	1	2-5	3,7 - 13,0	54 - 58	18	Имеет переднюю застежку и боковой разъем. Комплектуется съемными рукавами, воротником и фартуком.
	СК-Л	1	-	1,6 - 1,9	30 - 34	нет	Скрытого ношения. Изготовлен в виде жилетки. Защита тканевая.

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	СК-2Л	1 или 2					Скрытого ношения
	СК-М	1	2-5	3,3 - 12,6	46 - 50	18	Вшитый воротник и съемный фартук. Неразъемное правое плечо. Используются стальные БЭ
	СК-Н, СК-НП СК-2Н	1	2-5	2,4 - 13,7	38 - 44	18 - 21,5	Скрытого ношения. Могут применяться стандартные (S1=18) и профилированные (S2=21,5) БЭ.
	СК-О	1+ спец.	-	2,9 - 3,3	33-38	нет	Скрытого ношения. Полужесткий БЭ.
	СК-П СК-2П	1	– 2	2,1 - 2,8 5,3 - 6,0	37-51	– 18	Скрытого ношения. Усилена защита плеч
	СК-Р	1	-	1,2	50-56	нет	Внешний чехол с транспортной системой.
	СК-С	1	2	3,0-4,0	30	19	Не имеет металлических БЭ, Система вентиляции типа «heatcoat» (Великобритания)

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	СК-СА	1	–	4,4 - 5,0	63 - 75	–	Съемный воротник и фартук.
			2	8,4 - 9,0		22,5	
			3	12,3 - 12,9		24	
			4	12,9 - 13,5		18+6(3кл)	
			6	10,1 - 10,7		15+6(3кл)	
	СК-СБ	1	–	6,2 - 7,0	46 - 54	–	БЖ с воротником, фартуком и разгрузочным чехлом массой 1,4 кг, обеспечивающим защиту по 1 кл. ГОСТ на площади 25 $дм^2$.
			2	9,4 - 10,2		18	
			3	12,0 - 12,8		18	
			4	13,7 - 14,5		18	
			6	11,9 - 12,7		15	
	СК-СП	1	2 - 5	3,4 - 12,8	45 - 49	18	Для наружного ношения. Имеет фиксирующий пояс и широкие плечевые ремни.
	СК-Т. СК-2Т	1	–	1,7 - 2,2 +	43 - 53	–	Скрытого ношения. Могут применяться стандартные S1 и профилированные S2 БЭ
			3	3,3 - 6,6		8 - 21,5	
			5	12,5 - 13,0		21,5	
	6Б12-1	осколочная V_{50}=550 м/с	3 по МО	7,0 - 7,5	45 - 50	16,1 - 17,1	Бронежилет общевойсковой
	6Б13-1		4 по МО	10 - 10,5	45 - 50	16,1 - 17,1	Бронежилет штурмовой для МО РФ

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	6Б15	осколочная V_{50} = 400 м/с, 2г		3,5	45	нет	Комплект для экипажей БТТ. Состоит из бронежилета, противоосколочной накладки на штатный шлем и огнезащитного комбинезона
	6Б25	осколочная V_{50} = 400 м/с. 2г		3,5	45	нет	Комплект для экипажей транспортных средств ракетных войск и артиллерии
	ЗК для БВ.	осколочная V_{50} = 580 м/с, 1г		3,6	60	нет	Защитный комплект для экипажей боевых вертолетов
	Костюм охотничий Рысь	V_{50} = 400 м/с (дробь) V_{50} = 250 м/с (картечь)		нет данных	39	нет	Состоит из куртки и брюк. Дополнительно комплектуется жилетом с защитой от дроби.
	Защитный комплект сапера «Антей»	осколочная V_{50} = 700 м/с, 1 г		18	200	нет	Только тканевая защита. Состоит из куртки, брюк, перчаток и шлема с забралом.

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, дм^2		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
3. ООО «Центр специальных технологий «Бронник» 111250, г. Москва, 1-й Краснокурсантский проезд, дом 3/5, корп.11 Тел./факс: (495) 361-13-23 (495) 261-68-58 bronnik@nt-line.ru	Поплавок-3	2	5	7	17,5	7,5	Стальные БЭ с антирикошетным слоем. Возможен вариант с тканевой вставкой по 2 кл. ГОСТ. Грудь – по 5 кл., спина – по 2 кл., бока – по 1 кл. ГОСТ. Плавающий модуль массой 2 кг выполнен съемным. Водоизмещение 22 л. Разработан совместно с ОАО НИИ Стали
	Утес 2-2Ф	1	2	2,6	40	24	Тканевая броня
	Утес 5/1-2С	1+2	5	6,9	48	8	Наружного ношения. Защита дифференцированная. 5 кл.– спереди, 2 кл.-спина, 1кл. –бока. Использованы стальные БЭ + ткань
	Утес 5/2-5/2	1	5	10,4	48	16	Конструкция аналогична варианту 5/1-2С.

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
4. МГТУ им. Н.Э. Баумана 107005, г. Москва 2-я Бауманская, д. 5	Кора-Феникс	1	2-5	6,1-11,5	42-50	18	Тканевый комбинированный пакет + стальные или керамические БЭ. Имеет повышенный гарантийный срок эксплуатации
5. ЗАО «ВСТ-Спецтехника» (ЗАО «Витязь-спецтехника», ранее – Агентство по проблемам биомеханики и эргономики - АВЕ) 125130 г. Москва ул. Космодемьянских, д. 34/12 Тел./Факс: 450-10-30 974-13-30 info@vst-st.ru	Альфа	1	2	3,2-3,9	51	15	Базовый жилет, может комплектоваться стальными или керамическими БЭ 2, 3, 5 и 6 кл. ГОСТ. Сталь толщиной 2,2, 4,3 и 6,4 мм. керамика - 14,3 мм (6 кл.) и 16,3 мм) – 6а кл.)
	Альфа-М	1	-	3,4-4,0	53	15	Жилет в удлиненном варианте, комплектуется дополнительной защитой паха, шеи
	Альфа-А	1	-	2,7 – 3,9 с доп. эл. 3,7 – 5,3	34 – 50 с доп.эл. 50 - 74	15	Скрытого/открытого ношения, отличается усиленной конструкцией плечевого крепления. Имеет дополнительные элементы защиты плеч, шеи и паха.

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Атлас	1	2-3	2,3-8,2	50	18	Используются стальные БЭ толщиной 2,2 и 4,3 мм размером 270×350 мм.
	Риф	1	2-6	1,8 + 3,0 – 8,2 (БЭ)	32-48	15	Скрытого ношения. Может комплектоваться дополнительными стальными или керамическими БЭ
	Риф-Комфорт	1	-	2,0 – 3,0	32 – 48	нет	Имеет встроенную систему терморегуляции, включающую материал Outlast (микрокапсулы с фазовым переходом) + ячеистый слой из материала Fourline.
	Офис	1	-	2,0-2,5	34-40	18	Скрытого ношения. Используется специальная гигиеническая прокладка, впитывающая пот. Сертифицирован в Великобритании
	Тэста	1	-	2,3	46	нет	Скрытого ношения

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Тэста-М	1	-	2,3-7,9	46	нет	Скрытого ношения, комплектуется поджилетником с принудительной вентиляцией.
	Ника (женский)	1	Нет данных				Скрытого ношения. Используется специальная гигиеническая прокладка, впитывающая пот.
	ВСТ-6	1+ 2	6	3,4-9,0	30,5, в т.ч. 14 (1кл.)+ 16,5 (2 кл.)	14,4 (6кл.)	Для спецназа. Имеет воротник. Защита обеспечивается мягкой броней по 1-2 кл. ГОСТ. Комплектуется керамическими БЭ.
	ВСТ-ТТ	2	-	Нет данных			Скрытого ношения. Разработан по требованиям фирмы LBA (Великобритания).
	Карат	Нет данных					
	Квинта	Нет данных					
	Гриф	Нет данных					
	Бриз	Нет данных					

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, дм^2		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
6. Объединение «ВЫМПЕЛ» Тел. (495)213-68-56, 212-26-52, Адрес главного офиса: 103287, г. Москва, Старый Петровско-Разумовский пр., д. 1/23	Штурм	1	2-6	2,7-11,3	51	18	Увеличенная боковая защита
	Штурм-Ж	1	нет	2,7	51	нет	Женский бронежилет
	Штурм-ВВ	1	- 2 3 4 5 6	2,7 6,2 8,8 11,3 12,1 10,1	51	- 18 18 18 18 15	Имеется система разгрузки массы с плечевой области, климатический и демпфирующий пакет, защита плечевой области и паха. Дополнительная защита – стальные БЭ 2,2; 4,2; 5,8; 6,5 мм, или керамика.
	Штурм - ВВ-И	1	3	7.9-8,8	41-65	18	Демпфер из ваты
	Штурм – ВВ-А	1	2	5,2-6,2	40-50	18	-
	Штурм-ВМ (Нерпа)	Нет данных					Плавающий БЖ
	Штурм-ВВ-Ж	1	-	2,7	51	нет	Женский БЖ. Увеличена боковая защита
	Инспектор	1	- 2 3	1,7 5,2 7,9	40	- 18 18	Скрытого ношения. плавная подгонка по фигуре, стальные БЭ 2,2 и 4,2 мм.
	Инспектор –А	Нет данных					
	Инспектор-П	Нет данных					

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Президент	1	- 2 3 5	1,7 5,2 7,9	40	- 18 18	Скрытого ношения. БЭ стальные 2,2, 4,2, и 6.5 мм размещены в карманах внешнего чехла
	Агент	1	- 2	1,7 5,2	40	- 18	Скрытого ношения, БЭ стальные 2,2 мм
	Грот	1	2а	27	Нет данных		Защитный комплект сапера, состоит из куртки, брюк, рукавиц, воротника, жилета Кора-2 и шлема с забралом (уровень 2 по ГОСТ)
7.Компания «Сплав» г. Москва ул. Кетчерская, д. 16 Телефоны, офис: (495) 918-69-25 Телефоны, сбыт: (495) 375-74-04 Факс: (495) 918-72-03, splav@splav.ru trade@splav.ru	Казак 4 (С-01М)	1	-	2.1-2,5	36-40	нет	Тканевые пакеты из СВМ, Тварона
	Казак 4М (С-01)	1	-	1,6-2,1	27-30	нет	Тканевые пакеты из СВМ, Тварона-микрофиламента
	Казак 4 (С/Н-02)	1	2	4,5-4,9	36-40	15	Тканевые пакеты - Тварон, дополнительные БЭ - сталь
	Казак 4 (С/Н-03)	1	3	7.2-7,6	36-60	15	Тканевые пакеты СВМ, Тварон, стальные БЭ 4 мм
	Казак-4СС (Н-03)	1	3	7,9-8,9	50-60	15	Тканевые пакеты СВМ, Тварон, стальные БЭ 4 мм, масса БЭ 5,1 кг

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, дм^2		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Казак-4у (С/Н-05)	1	5	10,2-10,9	36-40	15	Тканевые пакеты - Тварон, стальные БЭ
	Казак-4КС (Н-06)	1	6(грудь) 3(спина)	9,5-11,5	50-60	7,5-грудь 7,5-спина	Ткань, сталь, композитно-керамический БЭ.
	Казак-5ССм (С-02 или С/Н-02)	2	-	3,3-4,0	15-18	нет	Данная серия не использует баллистических тканей, а только стальные БЭ в чехле.
	Казак-5СС (С-03 или С/Н-03)	1 (бока)	2	4,0-4,4	25-27	15-18	Бока - ткань. Грудь, спина – сталь авиационная.
	Казак – 5Ф	2	-	1,25	Нет данных		БЭ из Дайнимы
	Казак-6ССм (С/Н-03)	3	-	6,5-7,0	15	нет	БЭ - стальные 4 мм.
	Казак-6СС (С/Н-03)	1 (бока)	3	6,7-7,4	25-27	15	Бока - ткань. Грудь, спина – сталь
	Казак-6ССу (С/Н-05)	1	5	9,0-9,5	27	15	Тварон + сталь
	Казак-6ССум (С/Н-05)	5	-	8,6-9,2	15	нет	Сталь авиационная
	Казак-7 (С/Н-02)	1	2	4,2	50	12-18	Только тканевые пакеты из Тварона

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, дм^2		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Пилот	1	2	4.0-7,0	50	12-18	Только тканевые пакеты из Тварона, выполнен в виде куртки-безрукавки
8.НПО «Специальных материалов» 194044,Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр. 28а Тел.: (812)542-9220, Факс: (812)541-8115 commerce@ npo-sm.ru	Модуль-1	Спец.	-	2,8	Нет данных		Защита от заточки (50 Дж). Особая конфигурация титановых пластин. Воротник с защитой от удавки.
	Модуль-2	1	-	1,9	Нет данных		Тканевый, демпферы в области ЖВО
	Модуль-2(С)	1	-	1,4	Нет данных		Тканевый, повышенная скрытность ношения
	Модуль-С-12с	1	-	2,1	20	нет	Тканевые БЖ. Комплектуются разными чехлами (С, К, М, У), выпускаются открытого и скрытого ношения.
	Модуль-С-13с	1	-	2,5	30	нет	
	Модуль-С-14пп	1	-	3,4	41	нет	
	Модуль-3М-22с	2	-	6,1	20	нет	Моноблочные БЭ в чехле без тканевого модуля
	Модуль-3М-23м	2	-	7,8	28	нет	
	Модуль-3М-32ук	3	-	9,3	20	нет	
	Модуль-3М-42м	4	-	11,6	20	нет	
	Модуль-5М-51м22	2	5	11,7	20	11	БЖ с тканевым модулем или без него.
	Модуль-5М-51м13	1	5	9,2	30	11	
	Модуль-5М-61м13	1	6	12,6	30	11	

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты. дм^2		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Модуль-135м	1	-	2,6	35	нет	Трансформируемые БЖ скрытого / открытого ношения. Могут комплектоваться элементами защиты паха (7,2 дм^2) и шеи (14,5 дм^2) по 1 классу ГОСТ.
	Модуль-14	1	-	1,8	25-40	нет	
	Модуль-14у	1	-	3,5	41,2	нет	
	Модуль-21о14	1	2	4,1	40	11	
	Модуль-22к	2	-	5,1	20	нет	
	Модуль-22у14	1	2	8,1	41,2	20	
	Модуль-31м13	1	3	7,2	30,4	11	
	Модуль-32к	3	-	9,3	20	нет	
	Модуль-31с12	1	3	6,6	20	11	
	Модуль-31у14	1	3	7,8	41,2	11	
	Модуль-32у14	1	3	11,2	41,2	20	
	Модуль-51с12	1	5	7,9	20	11	
	Модуль-51с13	1	5	9,3	30,4	11	
	Модуль-51с22	2	5	11,5	20	11	
	Модуль-6	1	5	9,8	Нет данных		Периферийная защита от ПМ
	Модуль-7		6	9.3	Нет данных		Керамический БЭ
	Модуль-7М	2	6	10,9	Нет данных		Комбинированная защита на основе керамики. Периферийная защита от ТТ
	Модуль-С (Президент)	Нет данных					Выполнен в виде куртки, плаща, костюма, фрака и пр.

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, дм^2		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	6Б19 на базе: -Модуль 2с -Модуль 3с Модуль-3Мс	 1 2 2	 - - -	 2,8 6,9 5,6	 28 28 20	 нет нет нет	Плавающий жилет. Запас плавучести: 6 кг 3 кг 4 кг
9.НПО «Спецтехнология» 454080 г Челябинск а/я 9498 пр Ленина 79. офис 413 тел /факс (3512)65-58-03 65-37-17	Комфорт (1+)	1+	-	1,6	36	нет	Цифры обозначают класс защиты по ГОСТ. Первая цифра – на груди, вторая – на спине. 0-защита отсутствует. У – упрощенный крой, нет защиты боков, Т – использованы титановые БЭ. Плюс – превышение защиты по данному классу. Используются БЭ: -Дипломат-1, 400×270 мм, 1 кл., вес 0,45 кг. -Дипломат-2, 400×270 мм, 2 кл., вес-1,3 кг -СОФТ-2 (мягкий),2 кл., вес 0,75 кг, площадь.10 дм^2.
	Комфорт (1+) 0	1+	-	0,9	18(грудь)	нет	
	Комфорт 1-0	1	-	0,8	18	нет	
	Комфорт 1-0У	1	-	0,6	12	нет	
	Комфорт 1-1	1	-	1,4	36	нет	
	Комфорт 1-1У	1	-	1,0	25	нет	
	Комфорт 2-0	1	2	1,8	18	10	
	Комфорт 2-1	1	2	2,6	36	10	
	Комфорт 2-2	1	2	3,6	36	20	
	Комфорт 2-0У	1	2	1,6	12	10	
	Комфорт 2-1У	1	2	2,0	25	10	
	Комфорт 2-2У	1	2	3,0	25	20	
	Комфорт 2Т-2Т	1	2	3,6	36	18	
	Комфорт 2Т-2ТУ	1	2	2,9	25	18	
	Комфорт 2Т-0	1	2	2,0	18	9(грудь)	
	Комфорт 2Т-0У	1	2	1,6	12	9	

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, дм^2		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Комфорт 2Т-1	1	2	2,5	36	9(грудь)	-Хард-2 – металлический БЭ, 2 кл, 1,0 кг,.9 дм^2. -Хард-3 – металлический БЭ, 3 кл, 3,2 кг,.9 дм^2. -Хард-5 – металлический БЭ, кл.5, 4 кг.,.9 кв.дм.
	Комфорт 2Т-1У	1	2	1,8	25	9	
	Жилет охотника	-	-	2,0	60	-	Защита от картечи и дроби с 10 м.
	Шилд 5-0	1	5	5,5	18	9	Бронежилеты скрытого / открытого ношения с разгрузкой массы БЖ на пояс. Комплектуются составными БЭ, которые устанавливаются в наружные карманы сбоку.
	Шилд 5-0У	1	5	5,4	12	9	
	Шилд 5-1	1	5	6,3	36	9	
	Шилд 5-2	1	5+2	7,3	36	9 (по 5 кл.) 10 (по 2 кл.)	
	Шилд 5-1У	1	5	6,1	25	9	
	Шилд 5-2У	1	5+2	6.7	25	9 (по 5 кл.) 10 (по 2 кл.)	
	Шилд 3-0	1	3	3,2	18	9	
	Шилд 3-0У	1	3	3,1	12	9	
	Шилд 3-1	1	3	4,0	36	9	
	Шилд 3-1У	1	3	3,9	25	9	

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, дм^2		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Шилд 3-2	1	3+2	4,8	36	9 (по 3) 10 (по2)	
	Шилд 3-2У	1	3+2	4,2	25	9 (по 3) 10 (по2)	
	Шилд 3-3	1	3	8-8,3	34-41	16,7	
	Шилд 3-3 Эконом	3	3	6.7-7,0	16,7	16,7	Не имеет тканевого модуля
	Страж 5-0	1	5	5,0	11	9,5	Выполнены по типу бронежилетов «Кора-Кулон».
	Страж 5-0У	5	-	4,9	9,5	-	
	Страж 5-5	1	5	10,0	22	19	
	Страж 5-5У	5	-	9,8	19	-	
	Страж 3-0	1	3	3,4	11	9,5	
	Страж 3-0У	3	-	3,2	9,5	-	
	Страж 3-3	1	3	6,3-6,8	18	18	
	Страж 3-3У	3	-	6,6	19	-	
10. Абразивный завод Ильич 195009, С.Петербург,	Надежда-1	1	-	4,3	30	Нет данных	
	Комплект для гуманитарного разминирования	Противооскольчная защита		7-35	40	-	см. фирму МЕДПАСС п.12

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
Свердловская наб., д.12 Тел.(812)324-64-08, Факс:324-64-08, gol@spb.unireg.ru	6Б12	осколочная V_{50}=550 м/с	3 уровень по ТТТ МО	8-9	45 - 50	16	Общевойсковой БЖ для МО РФ
11. Фирма «АРТЕСС» (ранее - «Композит») Московская обл., г. Мытищи	6Б17	1	2+ПММ	5.0	40 - 42	11	БЖ для офицеров. Выполнен в виде куртки с застежкой молния спереди. На груди имеется карман для размещения БЭ.
	6Б18	1	2+ПММ	4,6	34 - 38	8-12	БЖ для офицеров. Выполнен в виде куртки с застежкой молния спереди. На груди имеется карман для размещения БЭ.
	6Б24 «Земляника-О»	1	2	4,5-5,0	-	-	Бронекомплект для старшего командного состава. Имеет летний и зимний варианты исполнения
	6Б12	осколочная V_{50}=550 м/с	3 уровень по ТТТ МО	8,5	45 - 50	16	Бронежилет общевойсковой

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
12. ЗАО «Форт технология» 117342, г. Москва, а/я 17 Тел (495) 362-91-10 www.fort.ru sales@fort.ru	Дефендер	выше 1	-	1,5 (1 кл.)	37	-	Обеспечивает защиту от АПС, Базовая модель скрытого ношения, модульная конструкция, БЭ типа VGM, VL
	ОК-Дефендер	выше 1	от 2 до 5	-	34	-	Скрытого ношения, модульная конструкция.
	ОК-Дефендер II	выше 1	До 5	Нет данных			Принят на снабжение ЦСН ФСБ РФ
	Патруль	-	выше 1	7, в т.ч. подстежка – 2,4	-	55	Выполнен в виде куртки. Обеспечивает защиту от осколков с V_{50} = 270 м/с. Имеет подстежку с противопульной защитой от АПС, использует БЭ типа VGM, VL
	Рейд	1 или 2	-	1,8	37	нет	Открытого ношения, выполнен в виде куртки без рукавов, используются бронеслои типа VGM, VL, СТТ (мягкий БЭ по 2 классу)

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Рейд –Л СТТ	1 или 2	-	4,0	37	нет	Выполнен в виде кожаной куртки без рукавов, использует бронеслои типа VGM, СТТ
	Рейд-Л	Осколочная V_{50}= 270 м/с		6.0	2.7 кв.м	нет	Противоосколочный костюм с огнестойким покрытием, 15 с в открытом пламени.
	Джони	1 или 2	-	4,5 – 5,5	50 - 80	нет	Куртка кожаная с рукавами, имеет модификации Джонни-Л, Джонни-ЛС, отличающиеся размером защитных панелей.
	Корсар	выше 1	- 2 5	2,1 2,6 4,4	32	- 8 8	Базовый вариант – из Дайнимы. Дополнительная броня типа ADP, ADP-2, не тонет в морской воде 3 часа
	Корсар-ПВ	выше 1	2	1,7 + 0,5…0,7	30	8	Плавающий, для морской пехоты, используется ткань из полиэтиленового волокна (панели типа ADP)
	Корсар-МП	выше 1	2	2,0 + 0.5…0,7	37	8	

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Корсар-2	Нет данных					По конструкции аналогичен БЖ Гусар. Выполнен из Дайнимы
	Корсар-9 Корсар -9S	1	- 5	2.9 5.4	36	- 8,5	Плавающий с разгрузкой. используется броня WR, усиленная WRS, ASP-M3
	Гусар	1	2-5	4,0 (без БЭ)	47	-	Застежка спереди, бронеслои ADP, ASP-M3
	Ямайка	выше 1	-	1,3	30	нет	Скрытого ношения, защита от АПС, UZI, МП-5 Применены бронеслои ОСМ, ПСП
	Редут	выше 1	2 5 6	3,2-7,8	46	20 8,3 9	В 5 кл. используются стальные БЭ 4,5 мм, в 6 кл. - керамический БЭ АСР массой 3,1 кг.
	Редут-2	выше 1	выше 5	8,2	46	-	Обеспечена защита в т.ч. и от М16А1 (V=1020 м/с) и пули Б3 к АКМ

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, дм^2		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Редут-Т5	выше 1	2(бока, воротник)+5	-	86	-	Штурмовой БЖ, на базе Редут-М, дополнен боковыми фартуками (2 шт.) и наплечниками. Использует бронеслои SP-M3, ASP-M1,
	Редут-М	выше 1	2 - 5	Нет данных			Модернизированный вариант Редута, использованы бронеслои ОСМ+ВУ (2 кл.) и ASP-M1 (5 кл.)
	Лимон	выше 1	-	1,5	30	нет	Скрытого ношения
	Дозор	выше 1	Нет данных				Использует БЭ БЖ «Лимон». Открытого ношения.
	Панцирь-С	2а	-	1,9	18	нет	Скрытого ношения из материала типа Дайнима
	Панцирь-П	2а	-	1,9	18	нет	Открытого ношения. Имеет 2 тонкие титановые пластины для защиты от заточки
	Президент	1	2	2,1	33	9	Скрытого ношения для VIP, мягкая броня, выполнен в виде жилетки

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, дм^2		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Улан	1	2-5	1,7 (база) 5,2 с БЭ	25-50	8-16	Универсальный БЖ, по конструкции защиты аналогичен БЖ Лимон и Дозор. Превосходит их по удобству расположения БЭ. Снабжен дополнительными элементами (воротник, пах, боковая защита). БЭ типа ПСП, ADP, ASP-M3
	Улан 25	1	2 - 5	4,7 (2 кл.) 10.5 (5 кл.)	36	8-16	Использует бронеслои БЖ Редут и двухсекционные стальные БЭ.
	Улан CS Улан MCS	II –IIIA по NIJ	-	3,5-6,7	25-50	7,7 – 15,4	По стандарту NIJ. Имеет дополнительные БЭ (пах, бока, воротник)
	Улан-Авангард-II	1	выше 5	9,7	26	-	Обеспечена защита в т.ч. от М16А1 (V=1020 м/с) и пуль Б3 к АКМ.

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Драгун	1	5	12	50	-	Отличается от БЖ Редут увеличенной площадью защиты. Использует бронеслои ОСМ, ВУ, ASP-M1 , ASP-M3.
	Грация	Выше 1	-	1,4	30	нет	Женский бронежилет скрытого ношения. Защита от АПС, UZI. Совместная разработка с Teijin-Twaron и Акзо-Нобель. Тканевый пакет из Тварона.
	Пилот	выше 1	2	4,5	50	-	Обычная куртка из натуральной кожи, используются бронеслои ОСМ или ПСП, при использовании дополнительных тканевых или пластиковых БЭ уровень защиты увеличивается до 2 по ГОСТ.
	Грасс	Осколочная, V_{50} = 330 м/с		4,5	170	нет	Выполнен в виде бронекуртки.

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Росич	Нет данных		6.5	до 70	-	Штурмовой бронежилет, создан на базе БЖ Дефендер и Редут-М. Имеет съемные элементы защиты паха, воротник и наплечники. В защите используются бронеслои ОСМ, ВУ, ASP-M3
	Воин-КМ	Осколочная V_{50} = 800 м/с рукава – V_{50} = 550 м/с		30	200	-	Штурмовой комплект, с противоосколочной стойкостью и защитой от всех пистолетных пуль. Дополнительные БЭ обеспечивают защиту от 7Н24, ЛПС, пуль М16А1 и М16А2.
	Гренадер	Штурмовой комплект состоит из бронежилета Драгун (5+кл., масса 10,9 кг), шлема Кивер-М (1+кл., 1,8 кг), пулестойкого забрала (1+ кл.), пулестойких брюк (2 кл., 6,7 кг), общая масса комплекта 20,8 кг.					

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Взрывозащитный костюм «Доспехи»	Противооскольчная защита V_{50}= 550 – 1100 м/с, маска – 700 м/с		39,3	230	20	Оснащен системой принудительного охлаждения, обеспечивающей работу в течение 30 мин. при +50°С. Исключено затекание ударной волны под шлем, уровень избыточного давления под шлемом не более 0,15 атм. Комплектуется проводной радиосвязью и дополнительными приборами разведки.
13. АО «СВОД» 109390 г. Москва, ул .Артюхиной, д 6, корп 2 Тел /Факс (495) 179-59-78	Скаф – П	1	-	1,1 – 1,8	35 –45	нет	Скрытого ношения
	Скаф – 2П	выше 1	-	1,6 – 2,2	45-55	нет	Защита от пуль АПС
	Скаф – М	выше 1	-	2,0 –2,6	40-50	нет	Имеется деталь паховой защиты.
	Скаф-4	1	2	5,2-5.8	40-50	18	Скаф-М с дополнительными БЭ.
	Скаф-5	1	3	8.4-8,9	40-50	18	Скаф-М с дополнительными БЭ.

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
14.ООО «ПРОГРЕСС» 169336, г. Ухта, п Водный, ул Ленина, 5а тел (82147)9-95-03 Отдел сбыта (82147)9-93-42 uzp@sever.ru www.varistor.sever.ru	Гарант-5	1	5	Нет данных		4,8-7,5	Масса керамического БЭ 3,6 кг, поверхностная плотность 360-480 $г/дм^2$.
	Гарант-6	1	6	Нет данных		4,8-7,5	Масса керамического элемента 3,5 кг, поверхностная плотность – 420-490 $г/дм^2$
15. «ГРАНЬ» г. Москва Открытое шоссе, 19-3-8 Тел/факс (495)919-81-82 Факс: (495) 368-18-51	Грань-П	1	-	2,7-3,5	40-50	нет	Скрытого ношения, пристегивающаяся панель паховой защиты
	Грань-Д	1	-	2,6-4,0	40-50	нет	
	Грань-БМ	1	Нет данных		47-55	-	Скрытого ношения
	Грань-БЖ	1	-	4,0	Нет данных		Индивидуальные заказы
	Грань-М	1	-	3,0-4,5	55-70	нет	Открытого ношения армейского типа
	Грань-К	1	-	3,0-4,5	55-65	нет	Для ВВС

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
16. Российский Федеральный Ядерный Центр ВНИИ экспериментальной физики 607190, г. Саров (Арзамас-16) Нижегородская обл., пр.Мира 37 Тел. (831-30)1-18-03, Факс (831-30)5-38-08, dc_3001@spd.mcnnov.su	Карсар М24-1	-	5-6	12,5	-	24	Используются керамические БЭ, количество – 24 шт. Живучесть – 3 попадания в БЭ
	Карсар М28	-	5-6	14	-	28	То же, только используется 28 БЭ
	Карсар М44	-	5-6	19.5	-	44	То же, только используется 44 БЭ.
17. НПО «Композит» 141070, г.Королев Моск. обл., ул. Пионерская 4 kompozit.mat@g23.relcom.ru www.advtech.ru	Витал-5К	1	2	5,4	41	7	Выполнен в виде жилетки
	Витал –ШТ	1	Нет данных	8,5	59	16	Штурмовой вариант, БЭ – керамические
	Витал-5Ш	1		7,0	50	15	Для групп захвата, БЭ - керамические
	Витал-К.1	1		1.5	36		Скрытого ношения
	Витал-5У	1		7,5	49	19	Для спецназа, БЭ - керамические.

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Витал-2ТСВ	1	2	2,7	40	9	Титановые БЭ (3 шт), скрытого ношения
	Виьтал-К3	1	2	2,7	40	9	Титановые БЭ (2 шт), скрытого ношения
	Витал-2ТК	1	2	2,2	34	7,5	Титановые БЭ (4 шт.)
	Витал-5П	1	-	7,0	49	10	3 БЭ
	Витал-5ПШ	1	Нет данных				
	Витал-2ТС	1	2	1,6	30	7,5	2 титановых БЭ, скрытого ношения
	Витал-2ТД	1	2	2,7	55	10,5	3 титановых БЭ, для детективов
	Витал-К.4	1	-	5,5	40	9	2 керамических БЭ, открытого ношения
	Витал-К3/4	1	-	4,5	40	9	2 титановых БЭ, скрытого ношения

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
18. Группа компаний «БАЯРД» 111024, Москва, шоссе Энтузиастов, дом 26 Тел.: (495) 362-22-24, Факс: (495) 361-68-50, www.bayardcorp.ru bayard@bayardcorp.ru	Гранит	1	- 2 3 5	1,9-2,1 4,7-5,4 6,8-8,0 8,7-10,1	33-38	- 14-16	Бронежилет скрытого ношения, выполнен по типу БЖ Визит-М (ОАО НИИ Стали), только вместо 2-х БЭ используется 3 БЭ, встроенных в тканевый модуль.
19. ИЗАС (Институт защитных систем) 141300, Моск. обл. г. Сергиев Посад д.7, а/я 171 Альфа Тел/факс: (495)584-99-75 (495)584-99-94 (49654) 6 75 36	Варан-охрана	1	2	4,4	29,4	18	Скрытого ношения, изготовлен из Дайнимы UD-66
	Варан-Драйвер	1	2 2+3	4,7-4,9 9,2-9,4	34-39	18 18(2)+18(3)	Скрытого ношения, изготовлен из Дайнимы UD-66
	Варан-Банк	1	- 2 3	2,5 4,9 9,4	36,4	 18 18(2)+18(3)	Изготовлен из Дайнимы
	Варан-Патруль Мод.3	1	- 2 3	3.0-3,4 5,4-5,8 9,9-10,3	41-48	 18 18(2)+18(3)	Открытого ношения, материалы – те же

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Варан-Патруль Мод.6	1	2 - 3	Нет данных			То же, что и Мод.3, только имеет меньшую площадь защиты
	Варан-Штурм	1	- 2 3	4,0-4,3 6,4-6,7 10,9-11,2	57-62	- 18 18(2)+18(3)	Открытого ношения
	Варан-Инкассатор	1	- 2 3	2,6-2,7 5,0-5,1 9,5-9,6	36-41	- 18 18(2)+18(3)	Скрытого ношения
	Альбатрос-М	1	2	2,3-3,7	40,6	18	Скрытого ношения, не используются металлические вставки.
	Варан-Рейнджер	1	2-6	3,1-10,6	52	18-15	Используются металлические или керамические БЭ. Армейский БЖ.

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
20. МЕДПАСС г. С.Петербург	Комплект для гуманитарного разминирования	Состоит из бронекостюма, защитных рукавов, съемного воротника, шлема, бронемодуля площадью 40 кв.дм, индивидуального устройства защиты слуха (90 дБ), противоминной обуви (защита от 50 г ВВ – Барс-1, или 100 г – Барс-2). Комплектуется портативным корректором психофизического состояния. Масса комплекта – до 35 кг. Защита от ПМН, ПМН-2 с 1 м, ПОМЗ-2М с 6 м, а также от пуль ТТ, АКМ с 5 м.					
21. ТОО «Сигма-95» (Сигма-Гикон, Сигма-СТ) 111024 г. Москва 1-я ул. Энтузиастов, 12 а Тел.: (495) 273-28-38 Факс: 292-65-11	Орех-2	1	-	2,3	42	нет	Скрытого ношения
	Орех-3	1	-	1,5	50	нет	Выполнен в виде жилетки
	Орех-4	1	2	5,5	42	18	Скрытого ношения. Используются стальные пластины 150×150 мм толщиной 2,1 мм (2 кл.) или 4,2 мм (4,2 мм).
	Орех-5	1	3	8,0-8,5	42	18	
	Орех-7	1	2 - 3	2,0 (без БЭ)	44	2,3 - 18	
	Орешек-С	3	-	6,5	18	нет	Отсутствует тканевая защита
	Орешек-Т	1	спец +2	1,8	21	7,5 в т.ч. 2,3 (2 кл.)	Скрытого ношения
22. Завод точной механики КЦ «Вега», г. Екатеринбург.	Армикс-9М	выше 1	-	5,5-6,2	36-41	нет	В структуре защиты используются 11 БЭ. В модификации «П» дополнительно устанавливаются 2 пластины массой 0,46 кг. Защита от АПС, и ПСМ
	Армикс-7Т	2	-	7,0-7,5	36-41	нет	То же

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, дм^2		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Армикс-7К	2	3	10,8-11,9	36-41	28	То же
	Армикс-7Д/М	выше 1	3	8,1-9.0	36-41	14.4	Грудь - 3 кл., остальное как в БЖ 9М
	Армикс-7Д/Т	2	3	8,8-10,0	36-41	14,2	Грудь - 3 кл., остальное – как в БЖ 7Т
23. УРАЛНИТИ г. Екатеринбург.	Булат	-	От пуль 7Н6М	Нет данных			Применены мелкие стальные БЭ с азотированным слоем, толщиной 1-1,5 мм, HRC 60-65 ед. Имеется 3 модели.
24. ЗАО «Завод защитных покрытий» 659315, г. Бийск ул. Васильева, д 64 тел./факс: (3854)23-3206 (3854)23-3296 http://www.zzp.ru	Центурион-2	1	-	4,5-7,5	27-44	-	Жилет состоит из стальных БЭ в виде чешуи. Снабжен мощным демпфером. Сталь собственной разработки, на 30% уступает стали 44
	Центурион-3	2	-	6,3-9,5	27-44	нет	Конструкция та же
	Биком-2	1	-	4,3-4,6	42	нет	Для милиции и служб безопасности
	Биком-2Т	1	2	6,3-6,8	42	14,4	Имеют дополнительные стальные БЭ
	Биком-3	1	2	6,9-7,4	34-37	до 18	

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, дм^2		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
25. «Голд-Лайф» (Дельта или Дельта-Оборона) г. Москва ул Большая наб д.17, офис 318 тел. 490-57-59	Дельта –1М	1	-	1,2	40	нет	Скрытого ношения
	Дельта-Фантом-1	1	2	3,5	Нет данных		Тканевый модуль со стальными БЭ
26. ТОО «Странник» 109428 г. Москва Рязанский пр. д.30/15 Тел. 317-92-93	Щит-С	1	2-3	1,5 - 8,0	35	15 - 17	Стеганый пакет ТСВМ, в который вставлены стальные монопанели толщиной 2 или 4,5 мм (пакет СГ-3 собственной разработки)
	Щит-С2/К	1	2-3	1.5 - 8,0	38	15 - 17	То же, что и Щит-С, только с защитой шеи
	Шит-05	1	2-3	1,5 – 8,0	45	15 - 17	Отличается повышенной площадью защиты боков и плеч.
	Президент	1	-	1,5 - 2,0	32	нет	Скрытого ношения

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, дм^2		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
27. ПО «БИОР» 187110 Ленинградская обл. г. Кириши Тел. (81268) 248-04	ЗБК-2	2	3	17.3, в т.ч. БЖ - 7,7	40,6 в т.ч. БЖ - 39	Нет данных	Состоит из бронежилета «БЖ» и противопульной накидки
	БЖ	2	-	7,7	39	нет	Тканевая оболочка с вставленными титановыми БЭ типа «чешуи»
	БЖ-2	1	-	2,2	12	нет	Скрытого ношения
	БЖ-2Т (Дипломат)	1	-	4,9	19	нет	Скрытого ношения
	БЖ-3	2	-	6,46	28	нет	Скрытого ношения
28. ЗАО «КИРАСА» 614094, г. Пермь ул. Челюскинцев, д.4 Тел./Факс (3422) 247-595 kirasa@kirasa.ru market@kirasa.ru www.kirasa.ru www.kirasa com	Кираса-1 Кираса-1А (Кираса 3-СП)	спец.	-	3,0 - 4,0	31 - 41	нет	Скрытого ношения, защита от холодного оружия
	Кираса-2	1	спец.	3,0 - 4,0	30 - 40	18-32	Скрытого ношения для частных сыщиков
	Кираса 3-1	1	-	1,7 - 2,2	40 - 50	нет	Открытого ношения, с защитой шеи. Комплектуется рюкзаком
	Кираса-2А (Кираса 3-1А)	Нет данных					

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты. $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Кираса-2В (Кираса 3-1В)	1	- спец	1,6 - 2,3 3,3 - 6,5	34 - 45	- 18 - 42	Скрытого ношения. Защита от холодного оружия достигается применением специальных БЭ
	Кираса 2-1	1	-	Нет данных		нет	Скрытого ношения
	Кираса-2Ж (Кираса 3-1Ж)	1	-	2 - 3.0	35 - 45	нет	Скрытого ношения в виде жилетки для бизнесменов
	Кираса-СП (Кираса 3-1С)	спец.	-	3,6 - 5,0	-	нет	Скрытого (модель СП) и открытого (модель СП1) ношения. Используются титановые пластины. Защита от заточки с энергией удара 45 Дж.
	Кираса-2АКЖ (Кираса 3-1КЖ)	1	Нет данных				
	Кираса-3 (Кираса 3-2)	1	2/IIIA (NIJ)	6,3 - 8,2	50 - 60	31 - 41	Открытого ношения с дополнительной панелью паховой защиты
	Кираса-3А (Кираса 3-2А)	1	2/IIIA (NIJ)	3,5 - 5,0	30 - 40	17 - 23	Скрытого ношения для полиции

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Кираса 3-2АУ	1	2/IIIA (NIJ)	3,2 - 4,5	-	17 - 23	Скрытого ношения, без защиты боков, титановые БЭ 120х106 мм
	Кираса 3-2А-Мини	1	2	1,2 - 1,4	17,5-20	5	Скрытого ношения, улучшенная эргономика
	Кираса 3-2АС	1	2/IIIA	3,5 - 5,0	30 - 40	17 - 23	Скрытого ношения, с частичной защитой боков, титановые БЭ 120×106 мм
	Кираса 3-2АР	1	2/IIIA	3,5 - 5	30 - 40	17 - 23	Открытого ношения, тканевый модуль, титановые БЭ размером 120×106 мм
	Кираса-3Б	1	2	Нет данных			Универсальный скрытого ношения для полиции и спецназа

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Кираса-3М (Кираса 3-2М)	1	2/IIIA (NIJ)	4,5 - 5,5	30 - 35	18 - 24	Модульный универсальный жилет, состоит из тканевого модуля и монтажной платы с БЭ. Обеспечивает 3 уровня защиты: - от холодного оружия - от пистолетов - от средств по уровню IIIA (NIJ)
	Кираса 3М1 (Кираса 3-2М1	1	2/IIIA (NIJ)	Нет данных			
	Кираса-Универсал (Кираса 3-2-01, Кираса 3-2-1)	1 (ГОСТ)/ IIIA (NIJ)/ 2-4 (CSN) (Чехия)	2 - 6 (ГОСТ)/ 3 - 4 (NIJ)/ 4 - 7 (CSN) Чехия	2,8 - 6,7 (без БЭ) + 1,3 - 3,9 (БЭ)	30-45	9,2	Открытого ношения. Имеет 8 базовых моделей тканевого модуля по 1 классу ГОСТ, IIA,II, IIIA – по NIJ и 2, 3 и 4 – по CSN (Чешский стандарт). Для достижения максимального уровня имеется набор БЭ (3 типа стальных и 1 тип керамических БЭ)
	Кираса 3Л (Кираса 3-2Л)	1	2	2,4-3,2	30-40	12-19	Скрытого ношения

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Кираса 3-2Ж	1	2	-	35-45	5	Скрытого ношения. Аналогичен БЖ Кираса 3-1Ж, комплектуется титановыми БЭ.
	Кираса СН мод.2-1; мод.2-01: мод.2-1СТ; мод.2-01СТ.	1	2	Нет данных			
	Кираса КЖ	1/II (NIJ)	-	3,0-6,0	-	нет	БЖ представляет собой кожаную куртку с пристегнутыми защитными элементами.
	Кираса 3АКЖ (Кираса 3-2КЖ)	1	2	3,5-4,5 без куртки 5,8 с курткой	45-60	20	БЖ пристегнут к кожаной куртке с помощью молнии. Комплектуется титановыми (толщина 2 мм) или UD БЭ.

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Кираса-D	I (ГОСТ) IIIA (NIJ) 2 - 4 (CSN) (Чехия)	- 2 3 5 6	3,4-5,7 +1,3-1,7 +2,3-2,9 +3,2-3,9 +3,5	40 - 50	14,5-18	Открытого ношения для полиции, армии. Имеет противоосколочный воротник, съемный фартук. Тканевый пакет с влагозащитной пропиткой. Стальные БЭ толщиной 2,2, 4,5, 6,5 мм и керамика 25 мм, размер БЭ 260х280 или 270х330мм.
	Кираса-L	как D	как D	2,8-6,9+как D	40 - 50	14,5-18	Для водителей и вертолетчиков. Имеет защиту шеи, плеч и паха, усиление – как в БЖ модели D.
	Кираса-Универсал СН	как D	как D	2,0-5,0 (без БЭ) + как D	35 - 38	9,2	Скрытого ношения. Структура защиты – как в БЖ Кираса-Универсал.
	Кираса-F	как D	как D	2,9-5,0 + как D	40 - 50	14,5-18	Открытого ношения. Для армии, спецназа. Имеется воротник, защита плеч.

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса. кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Кираса-Р	I - II (NIJ)	- 2 3 5 6	2,8-3,3 +1,3-1,7 +2,3-2,9 +3.2-3,9 +3,5	40 - 45	14,5 - 18	Тканевый модуль с влагозащитной пропиткой. Для усиления используются стальные БЭ 2,5, 4,5, 6,5 мм и керамика 25 мм, размер БЭ 260х280 или 270×330. Открытого ношения, для разведгрупп спецназа.
	Кираса 3МН	как D	2-5	2,6-4,4 + БЭ (1,3-3,9)	29-35	14,5-18	Для усиления используется только стальные БЭ толщиной 2,5, 4,5, 6,5 мм. Разработан по заказу МО Венгрии
	Кираса-N	как D	как D	3,0-6,9 + как D	40 - 50	14,5-18	Открытого ношения с воротником
	Кираса-Универсал СН-П	1 - II (NIJ)	как D	2,5-3,7 + как D	40 - 50	14,5-18	Плавающий, для береговой охраны, таможни
	Кираса-Ж	1 - II (NIJ)	-	1,8-4,2	-	нет	Скрытого ношения. Выполнен в виде жилетки с застежкой спереди. Для детективов, охранных агентств

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Кираса UA	как D	2-5	1,6-3,0 + 1,3-3,9 (БЭ)	40 - 50	14,5-18	Скрытого ношения с поджилетником.
	Кираса 3М-Н	IIIA (NIJ)	-	4,4 - 4,5	29 - 35	нет	Комплектуется дополнительным элементом защиты паха, шеи. Для полиции, служб охраны.
	Кираса-3М-05 (Кираса 3-4М)	1	2/IIIA 5	6-8 12-14	- -	18-24 17,4	2 модификации. 2 класс с титановыми БЭ или 5 класс со стальными БЭ. Открытого ношения. Может комплектоваться съемным воротником, защитным фартуком.
	Кираса-4	1	2а	Нет данных			Тактический жилет скрытого ношения
	Кираса 2-1	1	-	Нет данных		нет	Скрытого ношения
	Кираса-универсал, мод.5-1, мод.5-01	1	5	Нет данных			

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Кираса СН, мод.5-1 (Кираса 3-5С-1	IIIA (NIJ)	5	8,5 - 11,6	30 - 35	15 - 18	Скрытого ношения, чехол из водоотталкивающего капрона
	Кираса-5	1	2 5	5 - 9 8 - 15,5	30 - 60	18 - 36 9 - 18	Открытого ношения. Имеет воротник и защиту паха. Выпускается по 2 и 5 классу.
	Кираса-6-Б-1	1	6	8,5 - 9,0	40 - 50	15	Открытого ношения, для штурмовых операций. Керамические пластины, огнестойкий чехол, защитный воротник и выдвижная панель защита паха.
	Кираса 5-1 (Кираса 3-5М)	1	5	11 - 12,5	35-45	18	Жилет комплектуется съемными элементами защиты шеи, паха и плеч. Открытого ношения
	6Б12	осколочная V_{50}=550	3 (по ТТТ МО)	8,5	45 - 50	16	Общеармейский бронежилет
	6Б13	1	5	10,7 - 12,7	45,5-54	13-17	Армейский штурмовой бронежилет. Чехол из огнестойкой ткани

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	6Б21 6Б22 («Пермячка»)а	1 + осколочная V_{50}=540 м/с	3-4 по ТТТ МО РФ	8,5-11	160-180	-	Защитный комплект «Пермячка» состоит из защитного комбинезона, шлема, противоосколочных очков, бронежилета. Комбинезон обеспечивает противоосколочную стойкость V_{50} = 140 м/с. Стойкость к открытому пламени – 10 с. Принят на снабжение МО РФ в 2004 г.

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, дм^2		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
29. НПП "КЛАСС" 115409 г. Москва, Каширское ш.,50, кор.2 Тел./факс: 323-77-11	Кора-Кулон Кора-Кулон-1 Кора-кулон-II	2 3 4 5	-	5,2-5,9 8,4-10,1 10,9-12,6 11,7-13,6	21,5 (для 1) 25,0 (для II)	нет	Представляет собой 2 монопластины в тканевых чехлах, соединенных по бокам и плечам. Пластины 2-х типоразмеров. Принят на снабжение МВД Распоряжением Правительства РФ №731 от 15.10.01 г.
	Кора-Кулон-С	см. выше	-	см.выше	см. выше	нет	Отличается от Кора-Кулон тем, что предназначен для скрытого ношения, поэтому имеет фалды для заправки в брюки.
	Класс-КМ	1	- 2 3 4 5	2,5-2,9 5,9-6,3 8,9-9,3 10,6-11,0 11,4-11.8	42-51	- 18 18 18 18	Открытого ношения, 2 типоразмера, стальные БЭ, тканевый модуль из Кевлара или Тварона
	Класс-Т	1	-	1,2-1,6	26-35	нет	Скрытого ношения, без жестких БЭ.
	Класс-К	1	2 3	4.9 7.9	44	18 18	Для оперативных служб МВД, скрытого ношения

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, дм^2		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Кора-1МК	1	-	2,6	46	-	Открытого ношения, имеет фартук для защиты паха
			2	6,0		18	
			3	9,0		18	Принят на снабжение МВД постановлением Правительства № 731 от 15.10.01 г.
			5	11,5		18	
	Кора–1МКГ-1	1	2	4,4	42	9,5	Для ГАИ
	Кора-1МКГ-II	1	2	5,4	51	13	
	Кора-1МК-СН	1	2	4,8-5,6 (с алюм.)	35-39	15	Принят на снабжение МВД постановлением Правительства №3992 от 14.07.06 г.
				3,1-3,3 (с ПЭ)			БЭ из алюминиевых сплавов или высокомодульного полиэтилена - ПЭ (2 и 2а кл.)
			2а	3,3-3,7 (с ПЭ)			
	Корунд-В	1	-	3,4-3,8	60-68	-	Открытое ношение, влагозащитный чехол, стальные БЭ
			2	8,0-8,4		24	
			3	12,0-12,4		24	
			5	15,4-15,8		24	

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Корунд-ВМ	1	5+2	15,4-15,8	60-68	8 (по5) + 8 (по 2)	Имеет дифференцированную защиту. Грудь – 5 кл, спина – 2 кл. ГОСТ. Принят на снабжение МВД постановлением Правительства №3992 от 14.07.06 г.
	Корунд-ВМ-К	1	6а	9,4	54	12 + 2,3 (5 кл.)	Конструкция аналогична Корунду-ВМ, только вместо стального верхнего БЭ на груди и спине используются керамические БЭ. Принят на снабжение МВД постановлением Правительства №3992 от 14.07.06 г.
	Кора-1М	1	2 или 3	5,1 8,1	46	18 18	Имеется защита паха
	Кора-И	2 3	2 3	8,4 17,5	45	нет	Для инкассации, открытого ношения

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Жилетка	1 (2А) ГОСТ или IIIA NIJ	-	1,8-2,2	46-48	нет	Выполнен в виде жилетки.
	Поджилетник	2 3	-	3,0-3,6 5,5-6,6	15-18 15-18	нет	Используется как средство для повышения защиты изделий типа «Жилетка», однако может использоваться и самостоятельно. В защите применена сталь
	6Б12-4	1	3+2	8,4-8,5	46-50	8 (по5 кл.) + 8 (по2 кл.)	Выполнен по армейским требованиям, имеет дифференцированную защиту.

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	6Б23 6Б23-1 6Б23-2	осколочная V_{50}=540 м/с	2 3 4 (по ТТТ МО РФ)	4,0 7,9 7,2	48	16	Универсальный общевойсковой бронежилет. 6Б23 – с тканевыми БЭ, 6Б23-1 – с стальными БЭ, 6Б23-2 – с керамическими БЭ. Принят на снабжение МО РФ Приказом №239 от 05.07.03 г, на снабжение МЧС Приказом № 110 от 28.02.05 г.
30. ООО ППИ «ЗАЩИТА» 622000, г. Н.Тагил Свердловская обл. ул. Трикотажников, 1. Тел./Факс: 233-919, zashcita_nt@mail.ru	Малахит-02	1	2	5,0	48	18	Скрытого ношения
	Малахит-05	1	5	11,0	48	18	Имеется наружный карман для БЭ

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
31.ООО «АРСЕНАЛ» Украина, 65007, г. Одесса, пл. Михайловская 12/14 офис 85. Тел. + 38 (0482), 309228, 34 59 69. факс 38-048-7214526 E-mail: arsenal2@om.od.ua	Утес-5/2	осколочная. V_{50}= 560 м/с	5 +2	-	48,3	25 (2) в т.ч. 6 (5)	Открытого ношения Имеет дифференцированную защиту. Бока. спина и воротник - по 2 кл., усиленная только грудь по 5 кл. Материал – спецсталь.
	Шанс 2М	II(NIJ)	-	3,9-4,0	17	нет	Скрытого ношения. Стальные пластины + демпфер, общая толщина пакета – 20 мм.
	Шанс 3М	III(NIJ)	-	6,5-6,8	17	нет	Скрытого ношения Стальные пластины + демпфер, общая толщина пакета – 30 мм.
32. ОАО НИИ Стали 127411Москва, Дубнинская 81-а	Мод-1	1	-	0,9-1,1	36	нет	Скрытого ношения, комбинация арамидных тканей
	Мод-2	1	2	2,4-2,8	45	7,5	Выполнен в виде куртки. Фальшзастежка спереди

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
Коммерческий отдел (495) 485-35-10 Отдел рекламы (495) 485-70-70 Факс: 485-43-95 mail@niistali.ru www.niistali.ru	Визит-М	1	2	2,7 - 5,2	23 - 27	11 - 18	2 стальных БЭ спереди и 2 сзади встроены в тканевый модуль. Обеспечивают хорошую эргономику на уровне мягких БЖ
	Визит-МА	1	2	2,7 - 3,8	23 - 27	11 - 18	Вместо стальных используются алюминиевые БЭ
	Визит-МТ	1	2	2,2 - 4,2	23 - 27	11 - 18	Вместо стальных используются титановые БЭ
	Визит-2М	1	3	4,8 - 8,4	23 - 27	11 - 18	Конструкция аналогична Визиту М. Стальные БЭ из стали 44 толщиной 4,5 мм
	Визит-3М	1	5	6,4 - 11,9	23 - 27	11 - 18	Конструкция аналогична Визиту-М. Стальные БЭ из стали 44 толщиной 6,5 мм
	Стиль	1	2	2,7	35	21	Использована только тканевая защита
	БЖ-СН-2	1	-	2,5 - 2,7	42 - 49	нет	Бронежилет для МВД. Имеет увеличенную площадь защиты, в т.ч. боков
	БЖ-СН-4	1	2	7,3 - 8,4	42 - 49	23-28	
	БЖ-СН-6	1	2+3	9,4 - 9,9	42 - 49	13(2)+ 15(3)	

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	БЖ-СН-10	1	2+5	11,6 - 13,5	42 - 49	13(2)+ 15(3)	
	Вызов М1	1	2+3	13 - 17	58 - 70	39 - 46(2), в т.ч 20 - 23(3)	Модульный бронекомплект, состоящий из бронежилета и кокетки-портупеи, обеспечивающей защиту шеи, плеч, крестца и служащей транспортной системой.
	Вызов-М2	1	2+5	15 - 20	58 - 70	39 - 46(2), в т.ч 20 - 23(5)	
	Витязь	2	4	19	65	18	Защита торса, рук, ног, включая суставы. БЭ - стальные
	Булат-2	2	-	3,5	15 - 18	-	Стальные пластины в чехле + амортизатор + антирикошетный слой
	Булат-5	5	-	8,9	15 - 18	-	
	Бастион	1	5	8,0	30	8	Используются БЭ из стали 56
	Гжель	IIIA (NIJ)	IV (NIJ)	8,0	60	8,5	Выполнен по стандарту NIJ. Используются керамические БЭ. Имеет оригинальную конструкцию стыка воротника с БЖ, исключающую ослабленные зоны и швы.

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Жук	1	- 3 5 6	3 8.1 10.2 9,3	53	14-14.6	Штурмовой бронежилет. Имеет конструкцию, аналогичную. БЖ «Гжель». Комплектуется БЭ в виде стальных или керамических монопанелей
	Воин	осколочная	5	до 62	145	71	Круговая защита от осколков мин V_{50}=550 м/с
	Забрало-У	осколочная. V_{50}=600 м/с	2 - 4 (по ТТТ МО РФ)	4,5 – 8,0	57	16	Универсальный штурмовой БЖ. Минимальное использование арамидных тканей. Универсальный защитный модуль
	Дублон (ЗКС)	осколочная	2	16 - 42,8	204-215	30 - 68	Круговая защита от осколков мин типа ПМН-2 с 1 м Имеет 4 варианта исполнения (А, Б, В, Г), отличающихся уровнем защиты.
	Заслон	осколочная	2	16 - 42.8	204-215	30 - 68	Является модернизированным вариантом Дублона. Адаптирован под требования ГУВД г. Москвы.

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Витязь-ПМ Витязь –ПМ-1С	Круговая защита ПМН-2 с 1 м Фронтальная – осколок 1 г V_{50}=680 м/с		7,8-9,2	103	38	Облегченный комплект для сапера. Имеет 2 модификации: ПМ – с бронешортами и поножами и ПМ-1С – с фартуком.
	Десант	1	5	7,5	32	15	Стальные БЭ – из стали марки 56
	6Б11	осколочная V_{50}=540 м/с	2 по ТТТ МО РФ	4,6	52,5	17	Серийный общевойсковой бронежилет для МО РФ
	6Б12		3 по ТТТ МО РФ	8,5	47-55	17	Серийный общевойсковой бронежилет для МО РФ
	Атолл	1	2	5,5	44	18	Большая площадь защиты, включая бока
	Альпинист	2	5	11,8	32	11	Имеет специальную систему подвеса, позволяющую работать на вертикальных стенках вниз головой.
	Поплавок-2	2	-	4,9-5,5	18-20	нет	Плавающий БЖ. Положительная плавучесть 16 - 20 кг
	Поплавок-3	1	3	6,4-8,2	23-28	11,5-13,7	Плавающий БЖ. Состоит из

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Поплавок-5	1	5	8,6 -10,7	23 - 28	11,5 – 13,7 в т.ч. бока - 4	противопульного БЖ и чехла с пористым полимерным наполнителем, который может использоваться самостоятельно как спасательный жилет. Положительная плавучесть 16…20 кг
	Тандем	1	2	6,2	42	28	Защитный комплект для VIP. Состоит из бронежилета и жилетки, в которой установлена дополнительная защитная пластина
	Титан	IIIA (NIJ)	III(NIJ)	10-12,5	55	18	БЭ из стали 56
	Вольфрам	1	6	11,9	53	15	Наружного ношения с воротником и дополнительной защитой плеч
	Лидия	1	2	2,5	25	13	Женский бронежилет скрытого ношения
	Малыш	1	2	1,5	7,5		Детский бронежилет для детей 7-8 лет

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	ОЖ-1	Защита от дроби и картечи с 15 м		1,6-1,7	55	нет	Охотничий БЖ. Имеет непромокаемый карман для документов, сетчатый карман для дичи.
	Ковбой	1	-	4,5 в.т.ч. 2,85 (БЖ)	45 (БЖ)	нет	Для экипажей транспортных средств. Состоит из огнестойкого костюма и противоосколочного БЖ. Защита от открытого пламени – 10-20 с.
	6Б5 (Ж-86)						Серийный бронежилет. Выпускается с 1986 г. Имеет 18 модификаций. отличающихся уровнем защиты, назначением. В качестве БЭ – сталь, титан, керамика на основе карбида бора. БЭ размером 110х100 мм. Устанавливаются с перекрытием в карманы специальной монтажной платы.
	6Б5-11	осколок + ПМ		3	49,6	-	
	6Б5-12	осколок + ТТ		5		20	
	6Б5-13	АКМ-10м, М16-100м		11		18,3	
	6Б5-14	-«-		11		18,3	
	6Б5-15	-«-		11		20,1	
	6Б5-16	Грудь как 15, спина – ТТ		7		19	
	6Б5-17	-«-		7		19	
	6Б5-18	-«-		7		15,5	
	6Б5-19	Грудь как 15, спина - осколок		6		6,3	

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, дм^2		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	6Б5М 6Б5-16М, 6Б5-17М, 6Б5-18М	Грудь: АКМ, АК-74 с ТУС, 10м, М16А1 с 50 м. Спина – ТТ		8,2-8,8	49,6	16,2-17	Серийный бронежилет доводится до уровня современных требований: -усиливается защита и уменьшается ее площадь -улучшаются климатические характеристики -оснащается транспортно-разгрузочной системой
	6Б3Т	АКМ с 10 м, М16А1 с 100 м		9,8	49,6	18	БЭ-титановый сплав ВТ-23 с ТВЧ.
	6Б3ТМ	АКМ с 10 м, М16А1 с 100 м		10,8-12,2	49,6	18,3	Выпускался серийно с 1985 г.
	6Б3ТМ-01 (Ж-85Т)	Грудь - АКМ с 10 м, М16А1 с 100 м, спина – ТТ с 25 м		8	49,2	9 (грудь)+ 9 (спина)	Первый противопульный отечественный бронежилет общевойскового назначения. Принят на снабжение МО СССР в 1985 году. Выпускается серийно с 1979 г. Используется титановая броня ВТ-23 с ТВЧ упрочнением (грудь) и ВТ-14 (спина)

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	6Б4	АКМ с ТУС с 25м, М16А1 с 10 м		10,2 - 15,3	49,6	22,4 - 38	(6Б4-0, 6Б4-П, 6Б4-С отличаются заполнением БЭ). Первый отечественный общевойсковой БЖ высокого уровня защиты с керамическими БЭ на основе B_4C.
	6Б4-01 (Ж-85К)	Грудь: АКМ с ТУС с 25м, М16А1 с 10 м Спина: осколок до 700 дж		7,6 - 8,7	49,6	11,2 - 14,2 (грудь) 13-15 (спина)	Принят на снабжение МО СССР в 1985 году. Имеет дифференцированную защиту.
	6Б2 (для МО) Ж-81 (для МВД)	осколок и стрелки с энергией до 700 Дж		4,2	28	-	Первый отечественный общевойсковой противоосколочный БЖ. Разработан в 1979 году и в этом же году начал поставляться в Афганистан. В качестве бронезащиты впервые использована баллистическая ткань ТСВМ-ДЖ разработки НИИ Стали, ВНИИИВ и ГРАУ и титановые БЭ.

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	ЖЗТ-71	ТТ с свинцовым сердечником		7.9	40.5	нет	Первый отечественный противопульный БЖ, серийно выпускаемый по заказу МВД. Защитная структура включает титановые БЭ из ОТ4-1 толщиной 3 мм. Разработан в 1971 году. Имеет модификаций ЖЗТ-71У и ЖЗТ-71М.
	ЖЗТ-71М	2а	-	10.3	40,5	нет	Применен нагартованный титановый сплав ОТ4-ОН толщиной 4 мм (грудь), спина – как в ЖЗТ-71
	ЖЗЛ-74	спец.	-	3,4 – 3,9	47	нет	Облегченный БЖ для МВД. Защита от холодного оружия. Использован алюминиевый сплав АБТ-101. БЭ в виде рыбьей чешуи диаметром 50 мм располагались в 2 слоя, что обеспечивало надежную защиту в любых углах взаимодействия

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
33.ФГУП ГНЦ НПП "Технология" 249035, г. Обнинск, Киевское шоссе, д.15 тел. (08439) 6-28-41, Факс: (08439) 6-45-75 www technologiya.ru,	Без названия	1	3 6а	7,7 9,5	45	12	Выпускает керамические БЭ для бронежилетов. Размер 230Х260. Поверхностная плотность 33 $кг/м^2$ (для 3 кл.), 46 $кг/м^2$ (для 6а кл.).
34. НПСФ «Штурм-снаряжение и экипировка» 117218, г Москва, ул. Большая Черемушкинская, 23 Тел./Факс: (495)124-56-88 www.sturm-npsf.ru info@sturm-npsf.ru	Штурм-ВВ	1	- 2 3 5 6	4,1 - 4,9 7,9 - 8,7 11,3 - 12,1 14,5 - 15,3 10,1	62 - 69,9	нет 18 18 18 15	Используются стальные БЭ или керамика. Может комплектоваться съемным воротником и защитой паха, имеется боковая защита и антирикошетные карманы. Принят на снабжение МВД постановлением Правительства № 731 от 15.10.01 г.

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, дм^2		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Штурм-ВВ-М	1	-	4,1 - 4,9	57-67	нет	Открытого ношения. Съемный воротник. Стальные БЭ (3 спереди и 3 сзади). Комплектуется боковыми БЭ. Отличается от Штурм-ВВ наличием поясного ремня для размещения экипировки. Принят на снабжение МВД постановлением Правительства № 731 от 15.!0.01 г.
			2	7,1 - 9,3		17 - 27	
			3	9.6 - 13,8		17 - 27	
			5	12,1 - 17,8		17 - 27	
	Штурм-ВВ-У	1	-	4,4 - 5,8	56-81	-	
			2	7,6 - 10,1		18 - 24	Сталь 2,2 мм
			3-4	10,5 - 14,1		18 - 24	Сталь 4,3 мм
			5	13,4 - 17,7		18 - 24	Сталь 6,3 мм
			6	11,4 - 15,1		15 - 21	Керамика
	Штурм-1С Штурм-1С-М	1	-	4,1 - 4,9	62-70	-	Принят на снабжение МВД постановлением Правительства № 731 от 15.10.01 г. Защита обеспечивается стальными БЭ. 2,2, 4,3, 6,3 мм, спец. - 1 мм
			2	8,7 - 9,5		18 - 26	
			3	12,9 - 13,7		18 - 26	
			5	16,7 - 17,5		18 - 26	
			Спец.	6,5 - 7,3		18 - 31	

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Штурм-Ж	1	-	Нет данных			Женский БЖ
	Штурм- КЗП	осколочная, V_{50}=500 м/с		7,2-куртка 5,2-брюки 4,73-шлем 2,2-рукавицы	107 80 13 39	нет	Противоосколочный костюм. Состоит из куртки, брюк, жилета Кора-2, шлема Маска-1, рукавиц.
	Штурм-ВВ-И	1	- 2 3	2,1 - 2,7 5,3 - 5,9 8,1 - 8,7	37 - 46	- 18 18	Скрытого и открытого ношения. Принят на снабжение МВД постановлением Правительства №731от 15.10.2001 г. Изготовлен из гигроскопичных материалов. Выпускается 3 типоразмеров
	Штурм-ВВ-П	1	2	5,1 - 5,4	31,4 -40	18	Скрытого ношения. Принят на снабжение МВД постановлением правительства №731 от 15.10.2001 г. Имеет наружный карман для быстрой установки БЭ

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, дм^2		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Штурм-ВВ-А	1	2	5,2-5,4	34,6-40,8	18	Скрытого ношения. Принят на снабжение МВД постановлением Правительства №731 от 15.10.2001 г. Изготовлен из гигроскопичных материалов. Выпускается 3 типоразмеров, имеет фартук для заправки в брюки. Стальные пластины 2,2 мм
35. ЗАО «Щелковская шелкоткацкая фабрика» 141100 г.Щелково Московской обл. ул.Талсинская д.60 тел.526-93-56 koiol@shelkovo.com cor.ru www.shtf.ru	Ворон-01	1	2	3,1- 3,5	32 - 40	15	Бронежилеты скрытого / открытого ношения для широкого спектра задач.
	Ворон-02	1	2	4,0 - 4,2	50	10	
	Ворон 03	1	5	7,3 - 7,5	45	13,5 - 15	
	Ворон 04	1	2	2,2 - 2,5	32 - 36	15,4 - 17	
	Бизон-1	1	2 3	2,2 3,9	40 - 44	14,5 14,5	
	Бизон-4	1	2 3	3,0 4,7	42 - 46	14,5 14,5	

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
36. НПФ «ТЕХИНКОМ» 195030, г. Санкт-Петербург, ул. Химиков, 28 Тел /факс: (812)527-65-51 aa@front ru	НЕВА - 1	1	2	4,2 - 5,3	45 - 55	7,0 - 9,0	Бронежилеты “Нева-1”, “Нева-2”, “Нева-3”, “Нева-4” унифицированы, имеют единую конструкцию, которая предусматривает возможность изменения уровня защиты от 1 до 6а. Для этого БЖ оснащены быстросменяемыми тканевыми, стальными и/или органокерамическими бронепанелями «Гранит-4».
	НЕВА - 2	1	2	4,2 - 5,3	45 - 55	7,0 - 9,0	
	НЕВА - 3	1	2-6а	7,25 - 8,45	45 - 55	7,0 - 9,0	
	НЕВА - 4	1	5-6а	10,3 - 11,5	45 - 55	7,0 - 9,0	

Разработчик	Модель	Класс защиты по ГОСТ Р 50744-95		Масса, кг	Площадь защиты, $дм^2$		Особенности конструкции
		общая	усиленная		общая	усиленная	
	Скрытого ношения	6а	-	6	16	нет	2 керамических БЭ в тканевом чехле
	SPECIAL – 4	IV (NIJ)	-	7.5-8,5	19,5	нет	Штурмовой БЖ. Керамико-композитные БЭ на основе B_4C, SiC, Al_2O_3
	6Б13	осколочная, V_{50}=540 м/с		11,0	45 – 50	19,5	Оснащаются керамическими БЭ «Гранит-4». Масса БЭ размером 338х293 мм 3,5 кг
37. Научно-производственное объединение «Динафорс» г. Москва, Старый Петровско-Разумовский пр. д.1/23 тел. 727-10-51	БЖ-6	1	2-5	-	50	-	Наружного ношения. Имеет воротник и съемную защиту плеч.

Примечания:

1.В Приложениях 1, 2, 3 использованы данные, взятые из фирменных каталогов, рекламных буклетов и Интернет-сайтов (-данные из других источников).*

2. Некоторые данные, приведенные в Приложениях 1, 2, 3 могут стать устаревшими или изменяться с течением времени

Приложение 2

Шлемы российских производителей

Разработчик	Модель	Масса, кг	Уровень защиты		Площадь защиты, $дм^2$	Особенности конструкции
			Осколок (шарик 1г) V_{50}, м/с	Стойкость по ГОСТ Р 50744-95		
1. **НПО «Техника» (НИИСТиС)** г. Москва	Маска-1 Маска-1Р	4,5 с забр.	-	ТТ	13	Стальной цельноштампованный шлем. Имеет РПУ УКВ диапазона, дальность 1 км
	Маска-2	1,3	-	-	13	Противоударный с забралом
	Маска-3-1	1,7	-	1	12,5	Из высокопрочного полиэтилена
	Маска-3-2	2,2	-	2	12,5	Из высокопрочного полиэтилена
	Маска-3	1,6	-	2	11	Из высокопрочного полиэтилена
	Маска-4	1,5	700	1	12	Тканевополимерная, форма PASGT
	Сфера (СТШ-81)	2,4	-	ПМ с 5м ТТ с 25м	10	Специальный титановый шлем. Изготовлен из титановых фрагментов, вставленных в тканевый чехол
	СШ-68Н «Заготовка»	2,0	400	1	10,5	Модернизация серийного стального шлема СШ-68
	Колпак-1	0,8	-	-	11-12	Противоударный

Разработчик	Модель	Масса, кг	Уровень защиты		Площадь защиты, $дм^2$	Особенности конструкции
			Осколок (шарик 1г) V_{50}, м/с	Стойкость по ГОСТ Р 50744-95		
	КП-80	1,2	-	-	11-12	Противоударный с бармицей
	Колпак-1М	1,0	-	-	11-12	Противоударный
	Колпак-2	1,45	-	ПМ с 5 м	12	Противопульный стальной
2. Центр высокопрочных материалов «АРМОКОМ» Моск.обл. г. Хотьково	Скат	0.75 1,6 1,95	- - -	специальн. 1 2	16 16 16	Изготовлен из высокопрочного органопластика
	Скат М1	0,75	-	-	16	Композитный противоударный
	Скат 1М1	1,5	-	1	16	Композитный
	Скат 2ДТ	1,95 (2,95 с забралом)	-	2	15 + 5,3(забрало)	Изготовлен из арамидной ткани с применением дискретно-тканевой технологии
	СКИФ	1,4 2,1	-	1 1+2	18 в т.ч. 4,5 (2 кл)	Изготовлен из арамидных тканей. Имеет встроенный броне-элемент защиты лобной части.
	СКИФ 1М2	1,5-1,6	-	1	16	Тканевополимерный
	СКИФ 1/2М3	2,2-2,3	-	2	16 в.т.ч. 3,4 усиление	Тканевополимерный, усиление - металл
	СК-М2	1,45-1,5	-	1	18	Тканево-полимерная композиция
	СК-М3	1,7-1,75	-	1	18+6(стекло)	Имеет прозрачное противоударное забрало.

Разработчик	Модель	Масса, кг	Уровень защиты		Площадь защиты, дм^2	Особенности конструкции
			Осколок (шарик 1г) V_{50}, м/с	Стойкость по ГОСТ Р 50744-95		
	6Б7-1	1,3	580	1	11,4	Из органопластика на основе ткани Русар с гидрофобной пропиткой
	6Б7-1М	1,2-1,4	-	1	11,4	Имеет трехточечное крепление подтулейного устройства и большую осколочную стойкость
	Накладка для шлемофона	0,8	460	-	8	Входит в комплект 6Б25, 6Б15 (танковый)
	Для экипажей вертолетов	1,5	280 - 320	-	16	Устойчивость к открытому пламени – 10…15 с.
3. ООО «ОМНИТЕК-Н» г. Москва т.207-64-24 www.omnitek.ru	БЗШ тип «В» Тип «Н»	1,35 1,42 1,55	550*/535 610*/580 650*/620	ПМ с 20м II+(NIJ)/ 1(ГОСТ) IIIA(NIJ)/1 (ГОСТ)	10,5	Тканевополимерные шлемы на основе Тварона. Модели «В» и «Н» отличаются только формой. Сертифицированы в РП РНИИСЦ (Ржевка). Имеются модификации 3 уровней защиты
	ВК-3	1,54		ТТ с 25 м	10,5	Шлем с подвесной системой SHOTECH (Хорватия)
	Шлем парашютиста	-	450-550	9 мм Para - 380 м/с	10	Обеспечивает возможность прыгать в шлеме

Разработчик	Модель	Масса, кг	Уровень защиты		Площадь защиты, $дм^2$	Особенности конструкции
			Осколок (шарик 1г) V_{50}, м/с	Стойкость по ГОСТ Р 50744-95		
4. **Объединение «ВЫМПЕЛ»** г. Москва т.213-6856(сбыт)	ПШ-97 «Джета»	1,3	Защита от ударов		14	Противоударный пластиковый
	Б1-Л	1,4-1.5	-	1	18	Противопульный неметаллический для МО РФ. Может комплектоваться дополнительным бронеэлементом 4,5 $дм^2$ по 2 кл. ГОСТ
	Б-1Л	1,4-1,5	-	1	16 - 18	Противопульный с ударопрочным или противопульным (по 1 кл. ГОСТ) забралом
	Б1-М	1,5	-	1	16 - 18	Противопульный плавучий, морской вариант
	БЗШ	1,6	-	1	11	Из арамидной ткани, выпускается 2-х типов «В» - сферическая, «Н» - с ушами
	Сфера	4,5 с забр.	-	2	10	Составной шлем. Состоит из тканевой чехла с тремя карманами для стальных БЭ
5. **ЗАО «Штурм-снаряжение и**	Б-1Л	1,4 – 1,8	-	1-2	15, в.т.ч. 4,5 (по 1 кл.)	Шлем полимерный с стальной вставкой 2,2 мм
	Сфера	3,6	-	2	10	Стальной составной

Разработчик	Модель	Масса, кг	Уровень защиты		Площадь защиты, $дм^2$	Особенности конструкции
			Осколок (шарик 1г) V_{50}, м/с	Стойкость по ГОСТ Р 50744-95		
экипировка» г. Москва, www.sturm-npsf.ru	БЗШ тип Н или В	1,6	-	1	11-12	В – сферическая форма Н- с уширением в области ушей для переговорных устройств
6. **НПО «Специальных материалов»** С.Петербург	Колпак-1М	1,0	Защита от ударов		11 – 12	Противоударный пластико-титановый с забралом из поликарбоната
	Колпак-2	1,5	-	ПМ	11 - 12	Тканевополимерный
	Колпак-3	Нет данных				Стальной противоосколочный
	Колпак –3М	2,0	-	2	13, в.т.ч. 4,5 (по 2 кл.)	Стальной с дифференцированной защитой. Имеет усиление в височной и лобовой областях.
7.**НПП «КЛАСС»** г. Москва	ЗШ-1	1,7 с забр. 1,5 без забр.	500-550	1	14,5	Изготовлен из арамидной ткани. Имеется модель для экипажей бронетехники. Принят на снабжение МВД постановлением Правительства № 731 от 15.10.01 г.
	ЗШ-1-2	2,4	700	2	13,8	Изготовлен из алюминия Принят на снабжение МВД постановлением Правительства № 731 от 15.10.01 г.

Разработчик	Модель	Масса, кг	Уровень защиты		Площадь защиты, $дм^2$	Особенности конструкции
			Осколок (шарик 1г) V_{50}, м/с	Стойкость по ГОСТ Р 50744-95		
	ЗШ-1-2М	2,6-2,9 (без забрала) +1,1 (забрало)	700 ± 20	2	13,6-14,0	Выпускается 2-х размеров, забрало с защитой от ПМ, комплектуется радиогарнитурой с носимыми радиостанциями
	Маска-1	2,6 без забр.	-	2	13,8	Стальной шлем. Принят на снабжение МВД постановлением Правительства № 731 от 15.10.01 г. Комплектуется прозрачным противопульным забралом из поликарбоната
	Маска-1Ш	3.4 (без забрала)	-	2	13,8	Стальной цельноштампованный шлем с щелевым забралом
	Сфера-С	3,5	-	2	12-14	Стальной составной (3 секции) Принят на снабжение МВД постановлением Правительства № 731 от 15.!0.01 г.
	ПШ-97 «Джета»	1,3	-	спец	10	Противоударный с прозрачным забралом. Принят на снабжение МВД постановлением Правительства №731 от 15.10.01 г.

Разработчик	Модель	Масса, кг	Уровень защиты		Площадь защиты, $дм^2$	Особенности конструкции
			Осколок (шарик 1г) V_{50}, м/с	Стойкость по ГОСТ Р 50744-95		
8. **ЗАО «Форт Технология»** г. Москва	Кивер-М	1,7 + 1,4 (забрало)	564	выше 1	15	Толщина шлема 16 мм, имеется забрало и радиофицированный вариант
	Кивер-4	1,4	570	1+ (АПС)	12,5	Для спецподразделений
9. **ЗАО «Кираса»** г.Пермь	Кираса БШ-Э Модель 1 Модель 2 Модель 3	 1,2-1,3 1,45-1,6 1,5-1,65	 550/600* 640/700* 640/700*	 1 IIIA (NIJ) ТВО-2CZ	 12 12-13,6 12-13,6	Выпускается 2-х форм: тип А и тип С (аналог PASGT) Изготовлен из арамидных тканей. Комплектуется маскировочным чехлом.
10. **ООО ППИ «Защита»** г. Н.Тагил	Защита-У	-	Обеспечивает защиту от ударов с энергией 50 Дж.		12	Противоударный. Состоит из нескольких, жестко соединенных между собой металлических пластин.
	Защита-П	3,0	-	1	12	Противопульный стальной
	Защита-Т	3,5		2	12	Противопульный стальной
	СШ-68Н	2,0		1	10.5	Модернизация серийного шлема СШ-68 обеспечивается вкладышем из капроновой ткани
11. **Компания «СПЛАВ»** г. Москва www.splav.ru	Бронешлем	1,45	580	1	10,8	Композитный

Разработчик	Модель	Масса, кг	Уровень защиты		Площадь защиты, $дм^2$	Особенности конструкции
			Осколок (шарик 1г) V_{50}, м/с	Стойкость по ГОСТ Р 50744-95		
12. **ОАО НИИ Стали** г. Москва www.niistali.ru	6Б26 (П26)	0,9-0,95	580	1	11,5	Общевойсковой шлем. Изготовлен из комбинации арамидных тканей с использованием пленочных связующих. Принят на снабжение МО РФ.
	6Б27 (П-27)	1,25	680	1 + (ТТ с 40 м)	11,5	Штурмовой шлем. Принят на снабжение МО РФ
	6Б28 (П28)	1,0	580	1	11,5	Шлем десантника. Принят на снабжение МО РФ.
	6Б7 (П7)	1,2-1,3	580	1	11,5	Первый в России тканево-полимерный общевойсковой шлем. Принят на снабжение МО РФ в 2000 г.
	6Б6 (К6)	1,6	650	ПМ с 5 м ТТ с 50 м	12	Титановый цельноштампованный шлем. Изготовлен про уникальной технологии холодной штамповки с использованием штамповой оснастки из пластичного материала. Принят на снабжение МО РФ.

Разработчик	Модель	Масса, кг	Уровень защиты		Площадь защиты, $дм^2$	Особенности конструкции
			Осколок (шарик 1г) V_{50}, м/с	Стойкость по ГОСТ Р 50744-95		
	6Б6-3 (К6-3)	3,6 с забр.	700	2	13	Титановый цельноштампованный шлем с противопульным забралом. Уровень забрала – ПМ с 5 м.
	К8С	2,1	650	ПМ с 5 м ТТ с 50 м	12	Титановый шлем для сапера с противоосколочным забралом. Уровень защиты забрала V50=320 м/с
	Рысь-Т	3,7 с забралом	700	2	14	Титановый шлем для СОБР и ОСМОН МВД РФ. Комплектуется радиогарнитурой. Принят на снабжение МВД распоряжением Правительства РФ от 28.09.2007 г. № 1310
	Урал	2,0	750	2	12	Титановый шлем из нового титанового сплава. Принят на снабжение МВД распоряжением Правительства от 28.09.2007 г. №1310

Разработчик	Модель	Масса, кг	Уровень защиты		Площадь защиты, $дм^2$	Особенности конструкции
			Осколок (шарик 1г) V_{50}, м/с	Стойкость по ГОСТ Р 50744-95		
	6Б14 (СШ-68М)	1,7	550	1	11,5	Модернизированный стальной шлем СШ-68. Имеет тканево-полимерный вкладыш из арамидных тканей и новое подтулейное устройство. Принят на снабжение МО РФ в 2000 г.
	Витязь-С	4,5 с забралом	400	2	16	Цельноштампованный стальной шлем с противопульным забралом по 2 кл. ГОСТ.
	Кокос	1,5	-	2	6	Кепка бронированная для командного состава. Использованы стальные БЭ
	6Б8	2,2-2,5	-	2	10	Складной шлем для десантников. Состоит из 3-х сегментов.

* противоосколочная стойкость по STANAG 2120

Приложение 3

Щиты противопульные и противоударные

Разработчик	Модель	Масса, кг	Площадь, дм^2 (L×H) см	Уровень защиты по ГОСТ Р 50744-95	Особенности конструкции
1. **НПО «Техника» (НИИСТиС)** г. Москва	Забор-М	55	85	3	Штурмовой щит стальной
	Витраж-АТ	4,5	50 (91×55)	-	Противоударный алюминиевый щит с отверстиями сверху для обзора
	Витраж-М	3,1	60 (90×50)	-	Противоударный прозрачный щит из поликарбоната
2. **Центр высокопрочных материалов «АРМОКОМ»** Моск.обл. г. Хотьково	Папка деловая	0,8	7,0	1	Для бизнесменов
	Папка раскладная	10,5	13 (в сложенном) / 45 (в раскрытом)	5/2	Состоит из 3-х секций, раскладывающихся по типу детской книжки
	Керамический бронещит	28	60	6	Керамический щит, с прозрачным окном по 2 кл. ГОСТ, комплектуется фартуком и системой освещения.
	Бумажник	0,15	1,7 (17×10)	1	Используется тканевый баллистический пакет
	Веер	19	55 (99×55)	5	Керамический экран и органопластиковая подложка. Толщина 18 мм, внутренний радиус – 285 мм. Прозрачное окно по 2 кл. ГОСТ

Разработчик	Модель	Масса, кг	Площадь, дм^2 (L×H) см	Уровень защиты по ГОСТ Р 50744-95	Особенности конструкции
	СК-С1	3,5 4	54 (90×60) 72 (120×60)	Специальный	Противоударный щит. Снабжен прозрачным окном размером 400×100 мм
	ЛОКОС-2	16	132,5 (115×115)	1	Локализатор осколочно-взрывных устройств. Выполнен в виде одеяла.
3. **Объединение «Вымпел»** г. Москва	Одеяло противобомбовое	50	594 (230×230)	Осколки и фугасное воздействие	Состоит из 3-х элементов: тканевой конструкции в чехле красного цвета, защитного цилиндра с карманами, в которые установлены стальные БЭ, и дополнительных БЭ из композита площадью 10 дм^2.
	БЗТ-75М-05-01	8	21,5	3	Выполнены из стали Ц-85, толщиной 4,5-4,6 мм (модель 01) или 6,2-7,0 (модель 02). Имеют трапециидальную форму, согнуты под углом 160°, обтянуты прочной тканью
	БЗТ-75М-05-02	11	21,5	5	
4. **НПО «Специальных материалов»** С. Петербург	Штурм-1	5,2	29	ТТ, осколок V_{50}=650 м/с	Имеют окно с противопульным стеклом
	Штурм-2	9.2	29	АКМ, АК-74	

Разработчик	Модель	Масса, кг	Площадь, дм^2 (L×H) см	Уровень защиты по ГОСТ Р 50744-95	Особенности конструкции
5. **ЗАО «Форт Технология»** г. Москва	Арфа	10,5 + 1.3 (фартук)	18+ 9.8 (фартук)	5 (фартук - 2)	-
	Вант-ВМ	24	42	5 (фартук – 2)	Имеет бронестекло 5 кл. В модификации Вант-ВМ-Т вместо бронестекла используется цветная система видеонаблюдения.
	Вант-ЛМ (Т5)	14	28	5	Имеет фартук с защитой по 2-5 кл.
6. **ФСБ РФ**	ЭТЦ-11	90	102		Щит на колесах. Для защиты от взрыва 5 кг ВВ с 4 м
7. **НПП «КЛАСС»** г. Москва	БЗТ-75С	8.5-12,5	20	3-5	Принят на снабжение МВД постановлением Правительства от 15.10.2001 г. №731 Имеет трапециидальную форму. Изготовлен из листа броневой стали в тканевом чехле с амортизатором.
	БЩ-07	17	20	3	Бронещиток, имеет стекло того же уровня и антирикошетный слой.
	ПСЩ	17,5	31,2 (52×60)	5	Переносной стрелковый щит. Выполнен из противопульной стали толщиной 6,4 мм

Разработчик	Модель	Масса, кг	Площадь, дм^2 (L×H) см	Уровень защиты по ГОСТ Р 50744-95	Особенности конструкции
	Забор-М	55	85	5	Штурмовой щит. Имеет специальную подвесную систему для его транспортировки. Окно имеет тот же уровень, что и щит
	Передвижной щит	-	60	2А	Имеет стеклянное окно, вырез под автомат, колеса для передвижения.
	Штурмовой щит	-	50	6а	Щит выполнен по схеме изделия «Планшет» производства НИИ Стали, состоит из алюминиевой основы и керамического слоя. Тканевый фартук - по 2 кл. ГОСТ
	Папка	7,3	26	2	Имеет 2 модификации. Папка-1 с металлическими панелями и Папка-ТК – с тканевыми.
	ПЩ-04	4,1	60	-	Противоударный щит, обеспечивает защиту от ударов с энергией 50 Дж.
8. ОАО НИИ Стали г. Москва	Шит стальной	17 - 28	50	2-3	Выполнен из броневой стали толщиной 2,2 мм (Тип-1, 2 кл.) и 4,2 мм (Тип-2, 3 кл.). Имеет окно с бронестеклом того же уровня, что и сам щит.

Разработчик	Модель	Масса, кг	Площадь, $дм^2$ (L×H) см	Уровень защиты по ГОСТ Р 50744-95	Особенности конструкции
	Щит-планшет Планшет-2 Планшет-3	12.4 21,3	55 (в сложенном виде -20)	2 (в сложен.-3) 3 (в сложен -5)	Выполнен в виде складного планшета с сумке. Имеет противопульное окно. Изготавливается в 2-х модификациях.
	Щит-папка «Вьюк-П» «Вьюк-2П»	7,1	26,6 (в сложенном виде – 9.25)	2 (в сложен. -3) 3+2 (в сложен. - 5)	Выполнен в виде деловой папки для документов. В качестве БЭ используются стальные пластины толщиной 2,2 или 4,2 мм.
9. **ЗАО «КИРАСА»** г. Пермь	Витраж-КМ	2,5	75 (125x60)	-	Противоударный. выпускается 2-х форм – круглый и прямоугольный.
10.**ЗАО «Штурм-снаряжение и экипировка»** г. Москва	Витраж	3,8	65 (65x100)	-	Противоударный, из прозрачного поликарбоната с полиэтиленовой накладкой для увеличения жесткости щита.

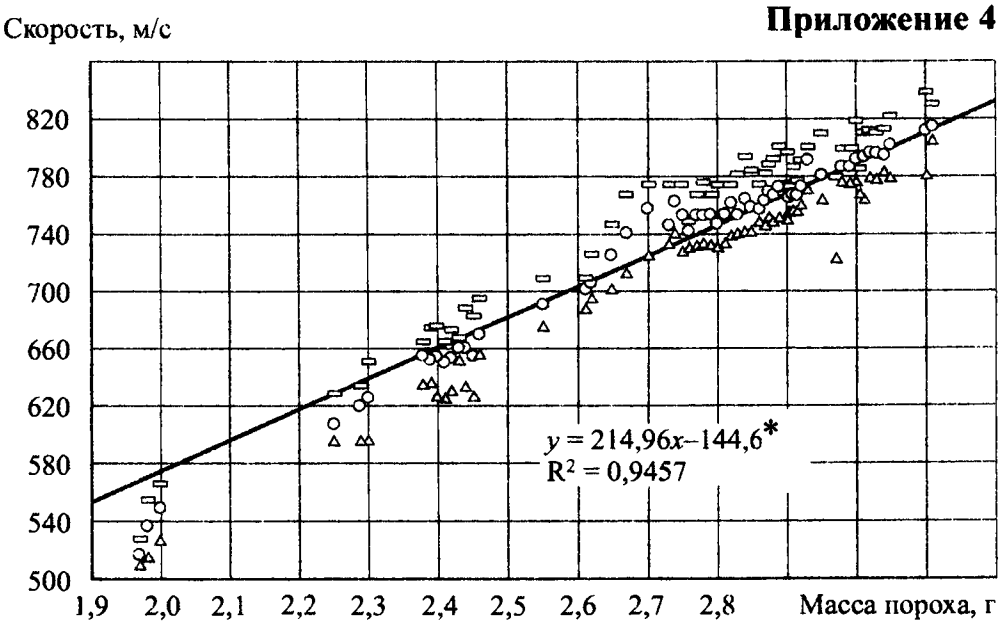


Рис. П4.1. Зависимость дульной скорости пули от массы пороховой навески при стрельбе из 7,62-мм винтовки СВД патроном 7-БЗ-3 с пулей «Б-32»: О – $v_{ср}$; Δ – v_{min}; ▭ – v_{max}; ▬ – линейный ($v_{ср}$).
* $y = y(x)$ – уравнение регрессионной кривой, R – коэффициент корреляции

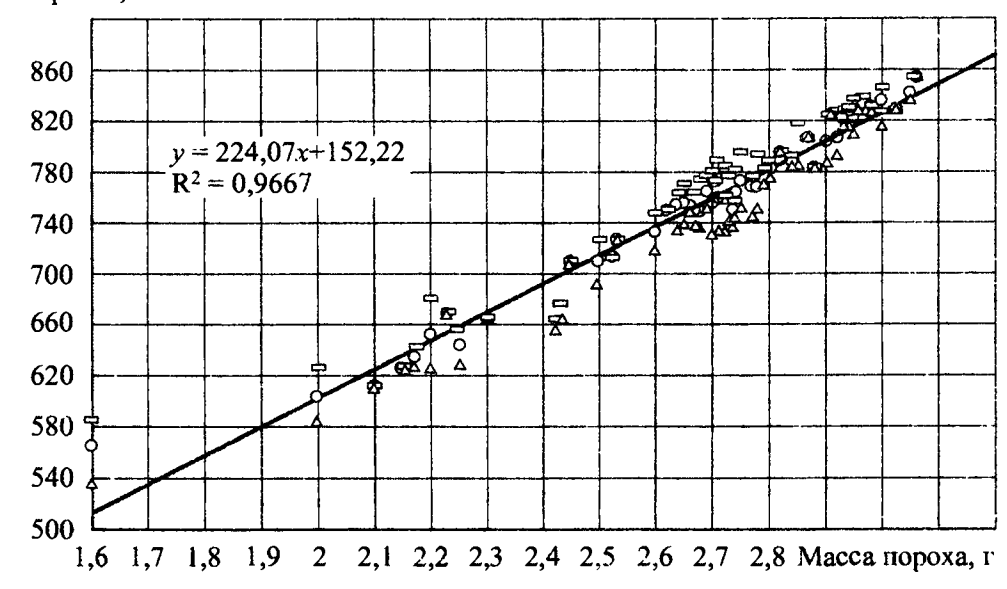


Рис. П4.2. Зависимость дульной скорости пули от массы пороховой навески при стрельбе из 12,7-мм баллистического ствола патроном 57-БЗ-542 с пулей «Б-32»: О – $v_{ср}$; Δ – v_{min}; ▭ – v_{max}; ▬ – линейный ($v_{ср}$).

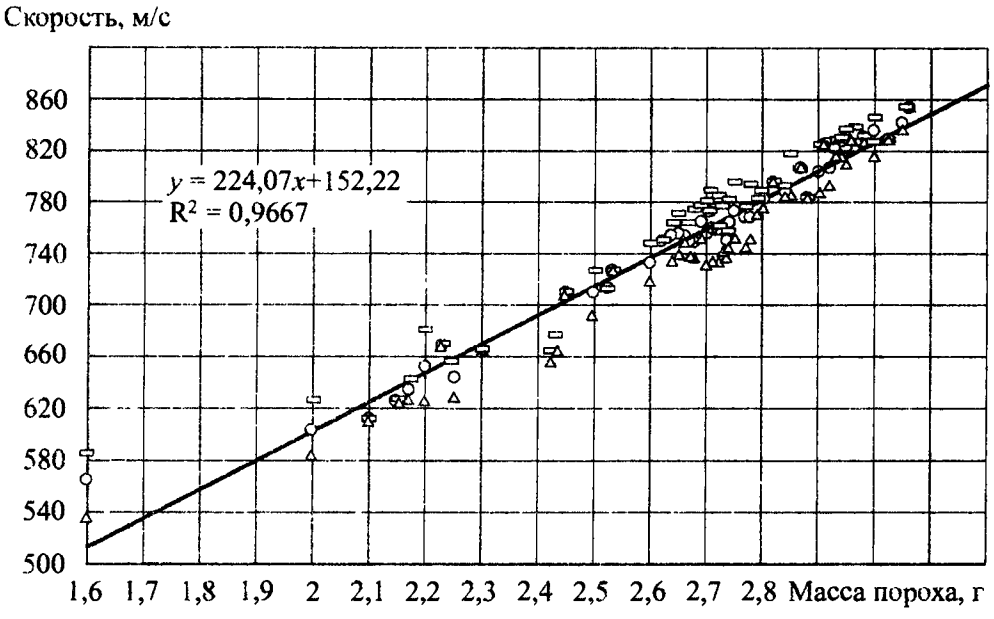


Рис. П4.3. Зависимость дульной скорости пули от массы пороховой навески при стрельбе из 7,62-мм винтовки СВД патроном 57-Н-323 с пулей ЛПС: ○ – $v_{ср}$; Δ – v_{min}; ▭ – v_{max}; ▬ – линейный ($v_{ср}$).

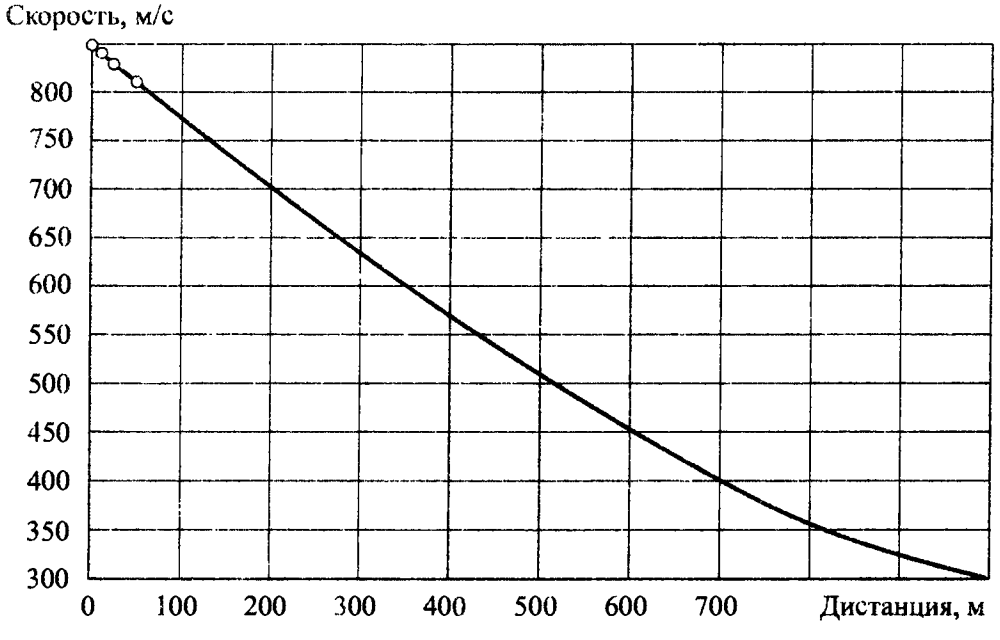


Рис. П4.4. Падение скорости пуль ЛПС по дистанции при стрельбе из 7,62-мм винтовки СВД патроном 57-Н-323, v_0 = 847 м/с.

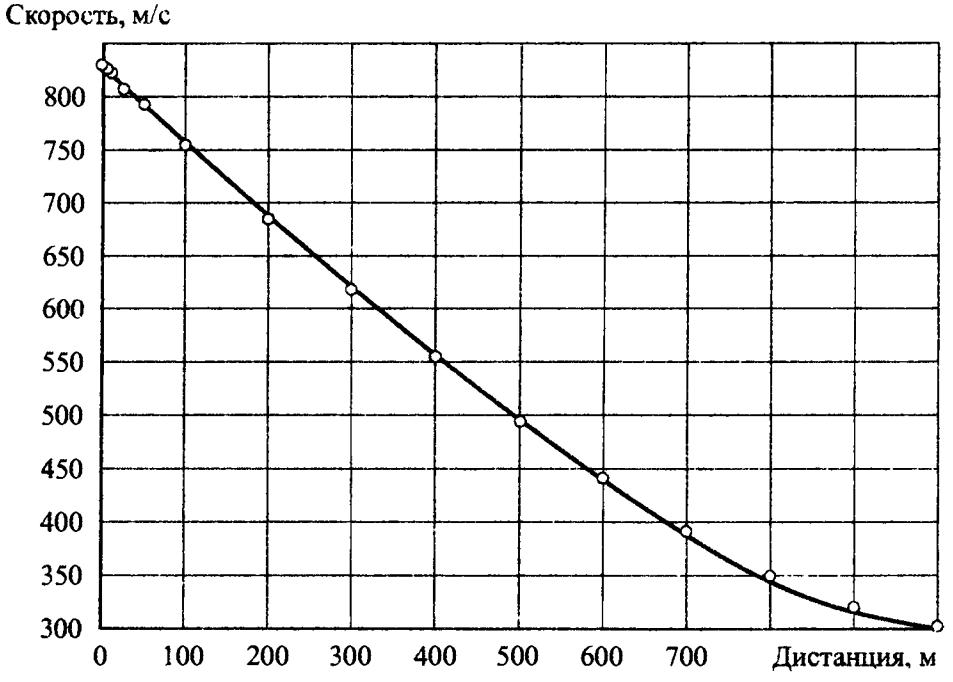


Рис. П4.5. Падение скорости пули Б-32 по дистанции при стрельбе из 7,62-мм винтовки СВД патроном 7-БЗ-3, v_0 = 830 м/с

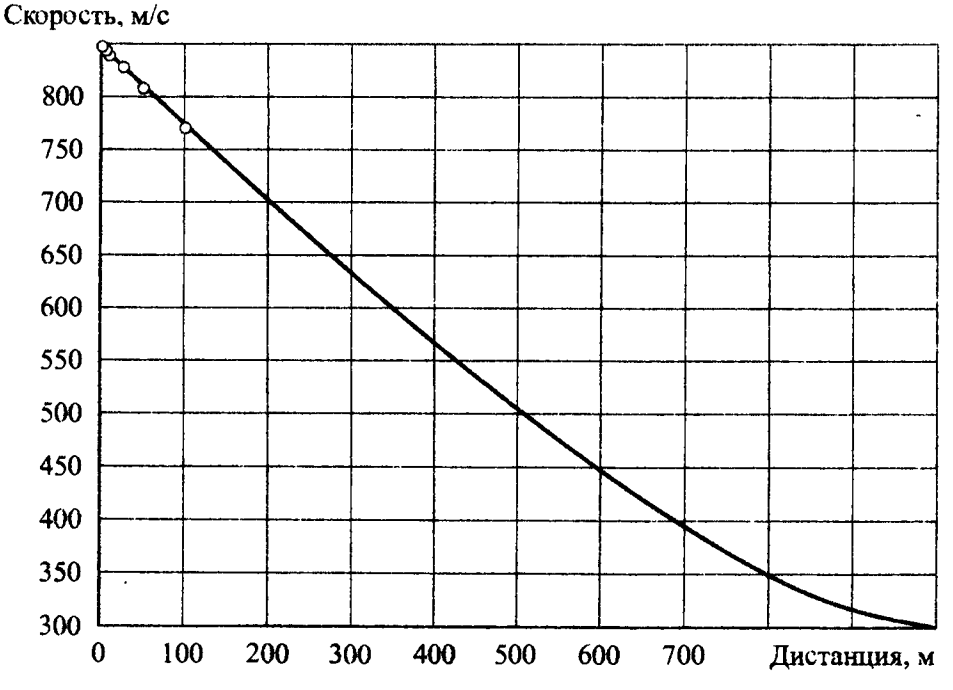


Рис. П4.6. Падение скорости пули СТ-М2 по дистанции при стрельбе из 7,62-мм винтовки СВД патроном 7Н13, v_0 = 848 м/с.

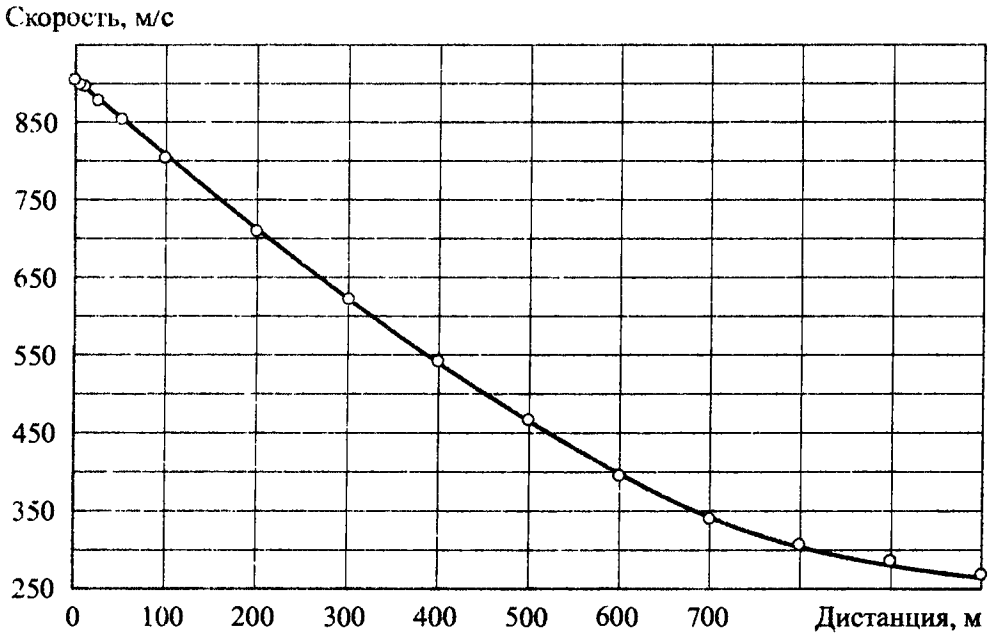


Рис. П4.7. Падение скорости пули Пст по дистанции при стрельбе из 5,45-мм автомата АК 74 патроном 7Н6, $v_0 = 906$ м/с.

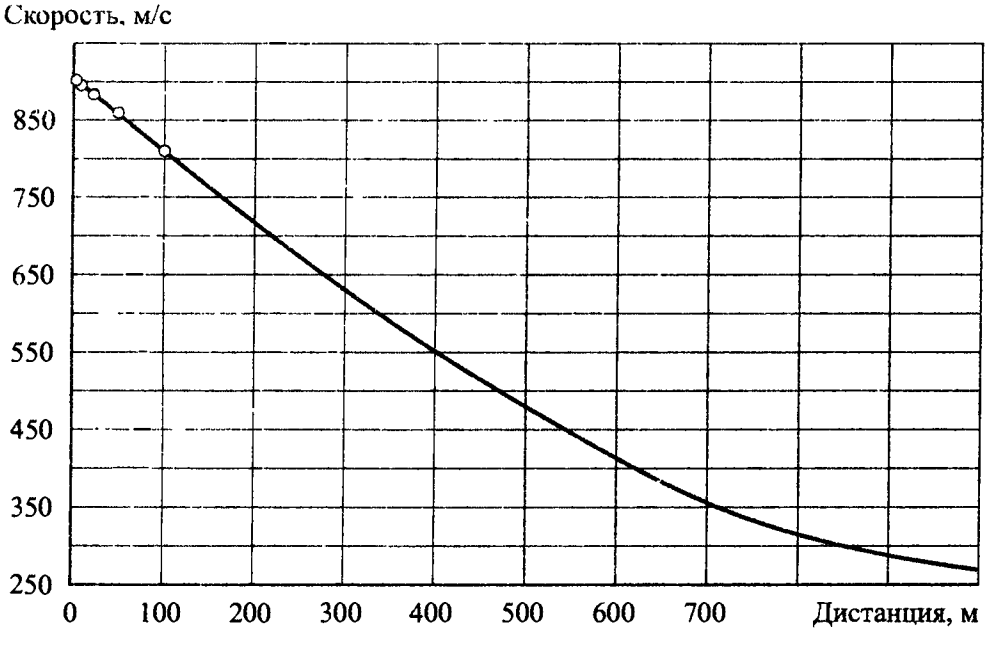


Рис. П4.8. Падение скорости пули ПП по дистанции при стрельбе из 5,45-мм автомата АК 74 патроном 7Н10, $v_0 = 905$ м/с.

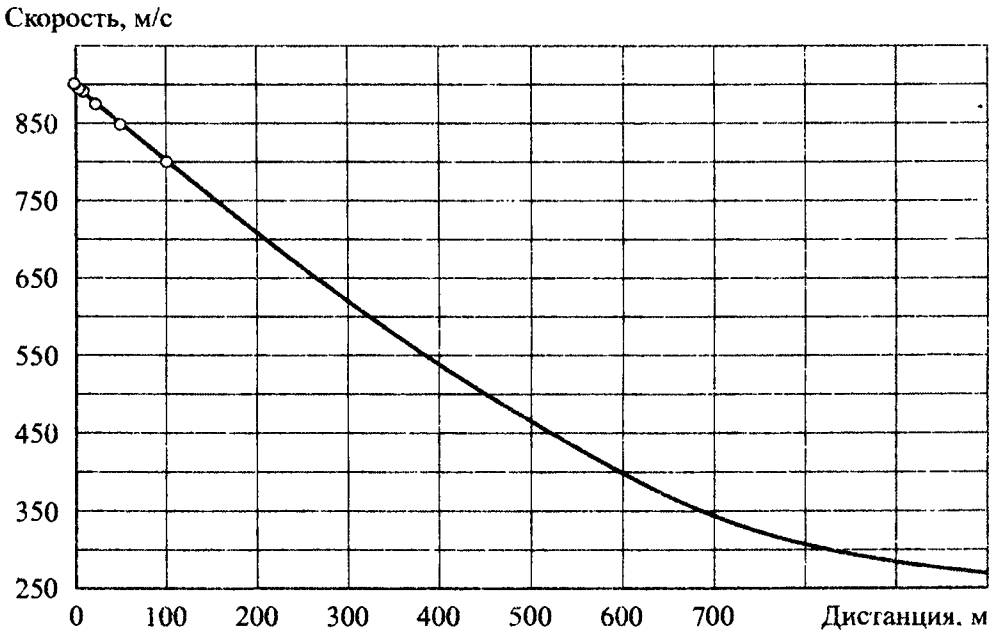


Рис. П4.9. Падение скорости пули по дистанции при стрельбе из 5,45-мм автомата АК 74 патроном 7Н22, $v_0 = 900$ м/с.

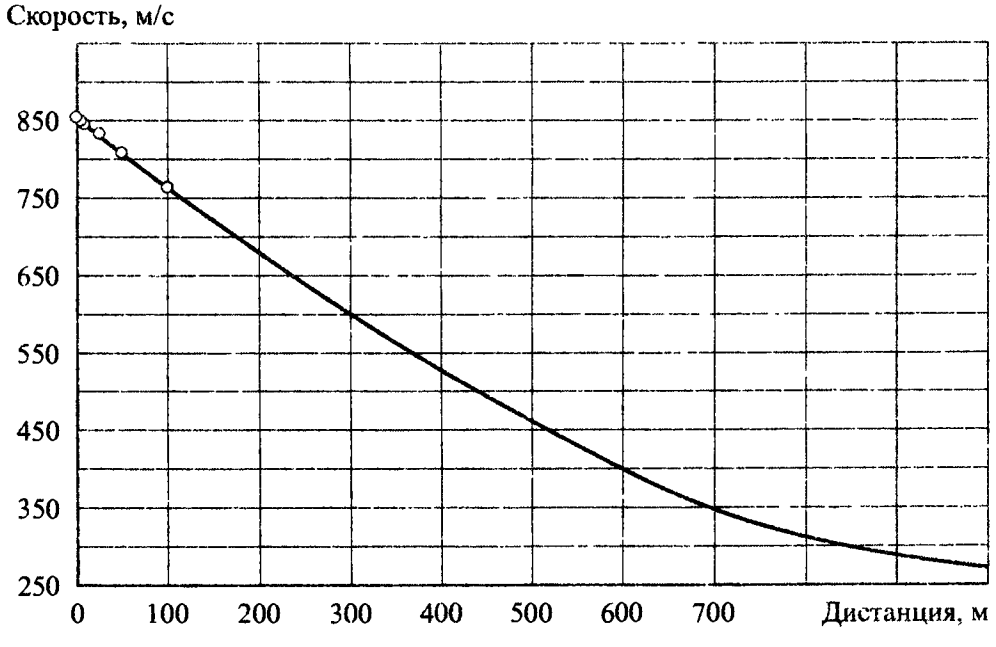


Рис. П4.10. Падение скорости пули по дистанции при стрельбе из 5,45-мм автомата АК 74 патроном 7Н24, $v_0 = 853$ м/с.

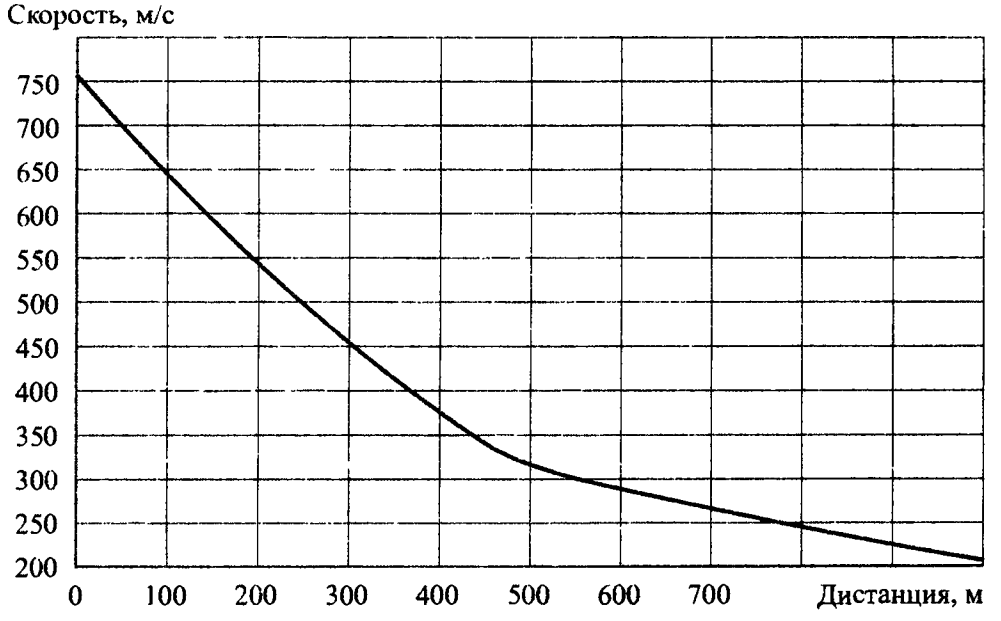


Рис. П4.11. Падение скорости пули БЗ-43 по дистанции при стрельбе из 7,62-мм автомата АК М патроном 57-БЗ-231, v_0 = 762 м/с.

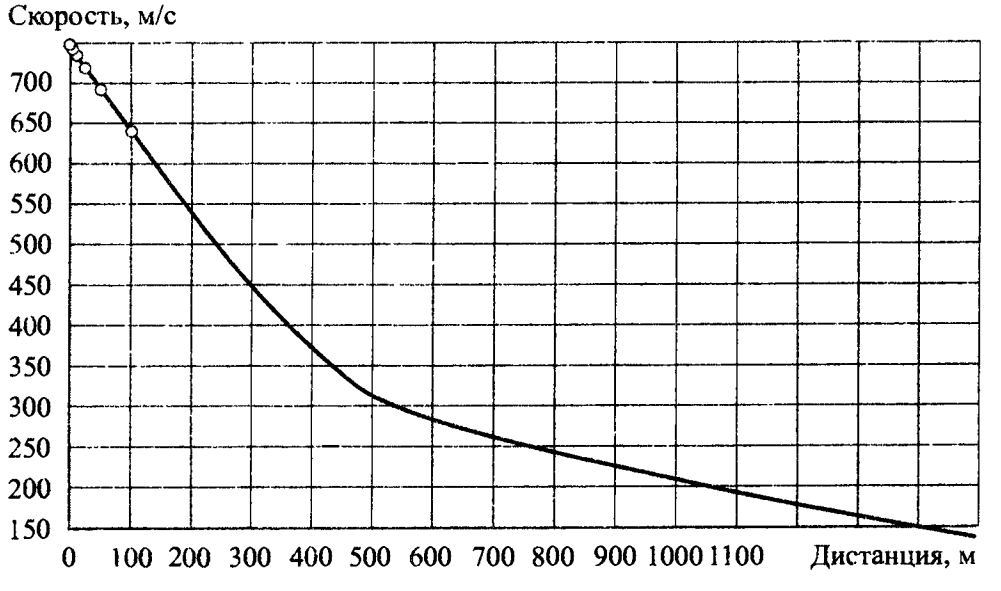


Рис. П4.12. Падение скорости пули ПС-43 по дистанции при стрельбе из 7,62-мм автомата АК М патроном 57-Н-231, v_0 = 746 м/с.

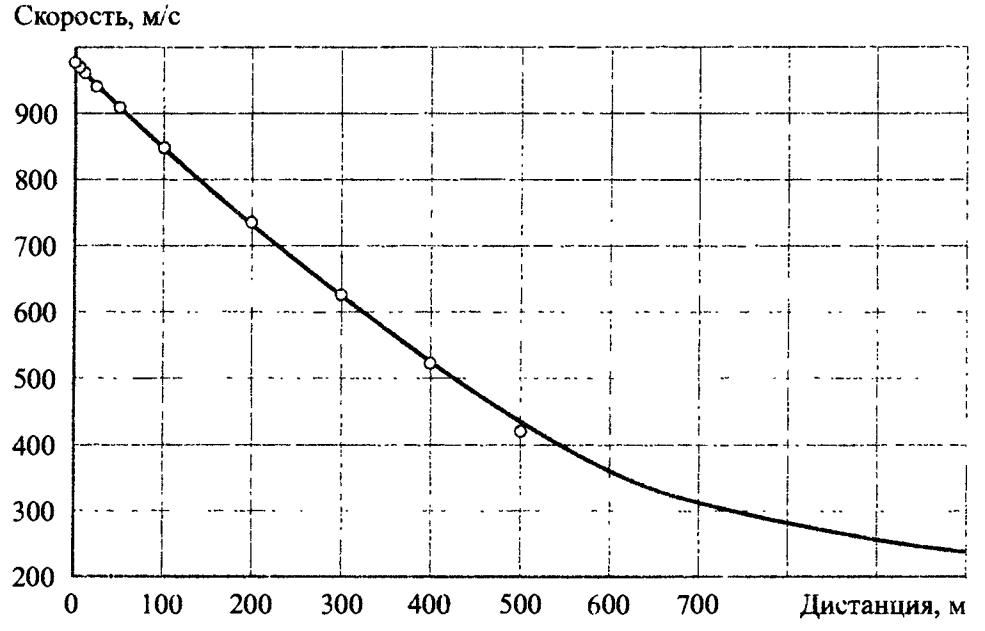


Рис. П4.13. Падение скорости пули М-193 по дистанции при стрельбе из 5,56-мм винтовки М16А1 (США), $v_0 = 975$ м/с.

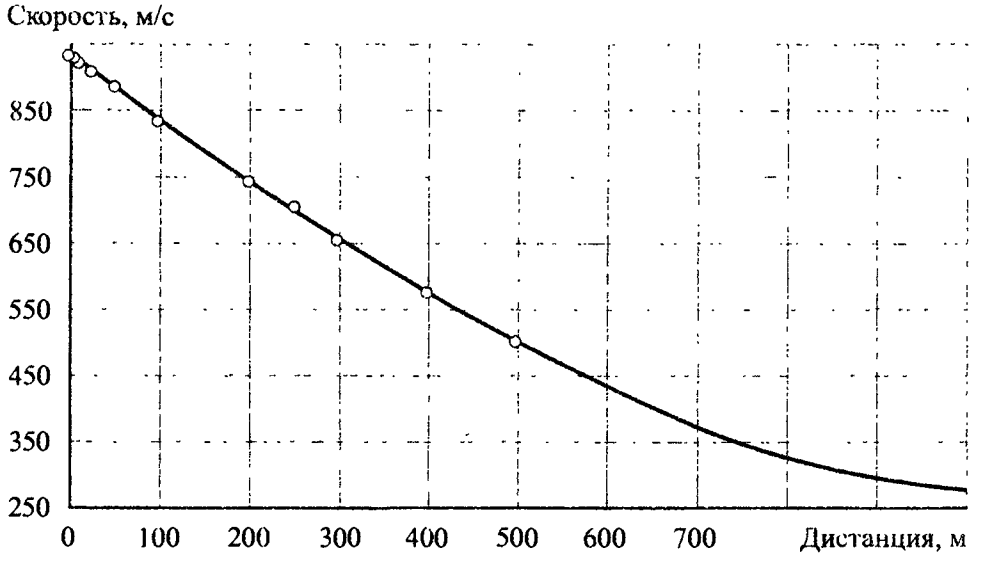


Рис. П4.14. Падение скорости пули SS-109по дистанции при стрельбе из 5,56-мм винтовки М16А2 (США), $v_0 = 930$ м/с.

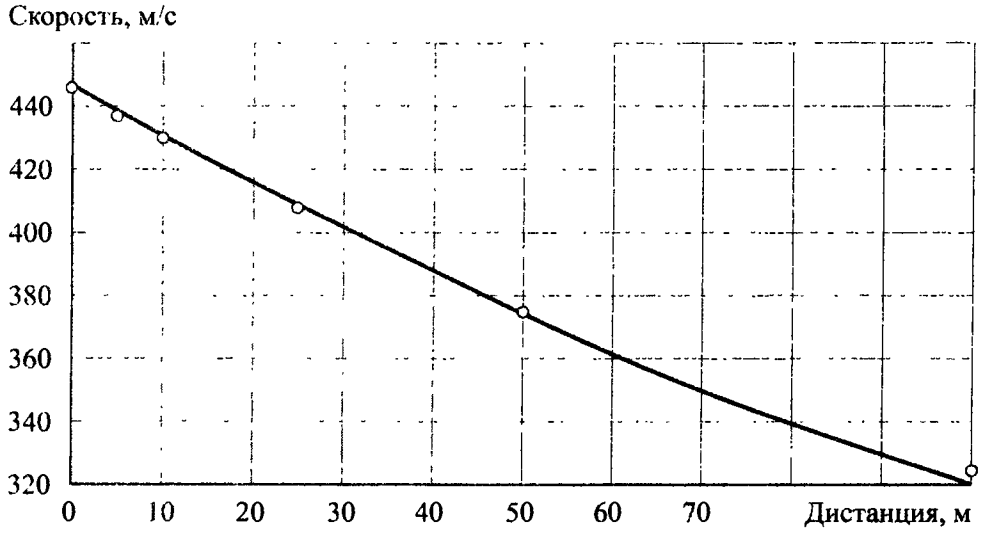


Рис. П4.15. Падение скорости пуль по дистанции при стрельбе из 7,62-мм пистолета ТТ патроном 57-Н-134С с пулей Пст, v_0 = 446 м/с.

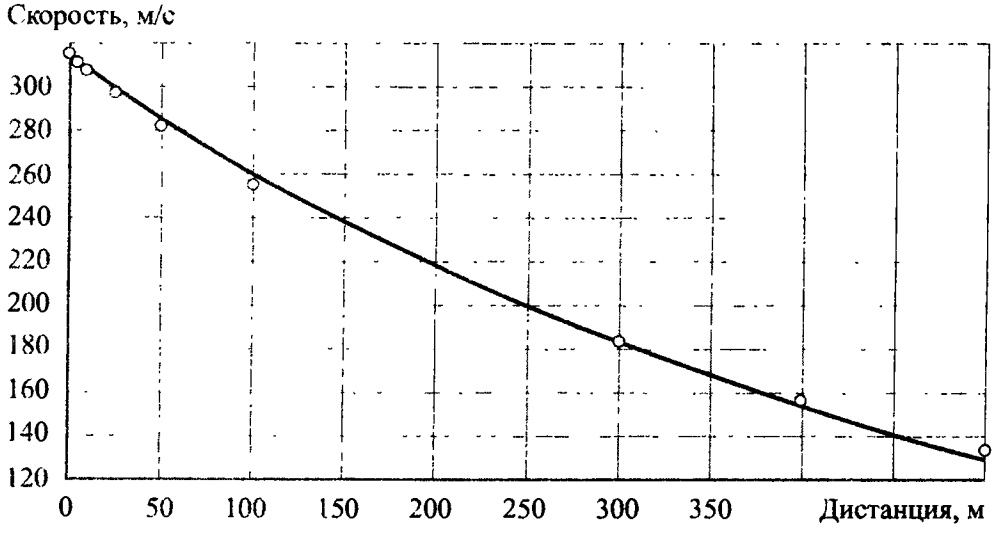


Рис. П4.16. Падение скорости пуль Пст по дистанции при стрельбе из 9,0-мм пистолета ПМ патроном 57-Н-181С, v_0 = 315 м/с.

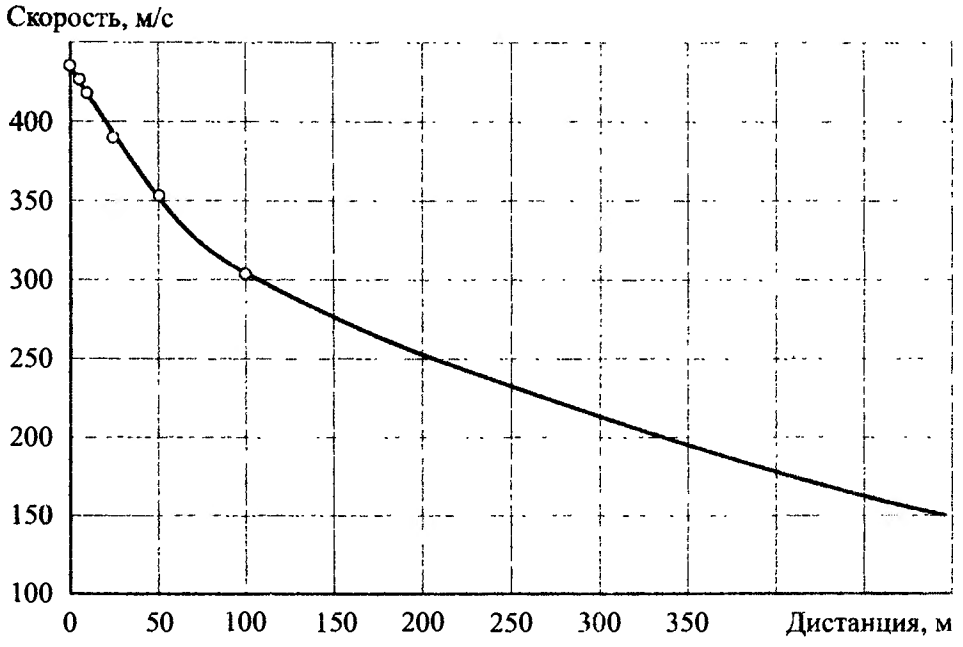


Рис. П4.17. Падение скорости пуль по дистанции при стрельбе из 9,0-мм пистолета ПММ патроном 7Н16, $v_0 = 435$ м/с.

Научное издание

Григорян Валерий Арменакович
Кобылкин Иван Федорович
Маринин Вячеслав Михайлович
Чистяков Евгений Николаевич

МАТЕРИАЛЫ И ЗАЩИТНЫЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО И ИНДИВИДУАЛЬНОГО БРОНИРОВАНИЯ

Под редакцией Григоряна В.А.

Ответственный за выпуск *А.М. Мансуров*
Редакторы: *А.Н. Белобородько, Б.Ф. Махов*
Художник *И.Б. Кочешкова*
Компьютерная графика: *И.Б. Кочешкова, Т.В. Волкова*
Компьютерная верстка *И.Б. Кочешкова*

Оригинал-макет подготовлен
в ОАО НИИ стали

Сдано в набор 23.05.2008. Подписано в печать 24.07.2008.
Формат 84×108/32. Печать офсетная. Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс». Печ. л. 12,75. Тираж 500 экз.

Издательство «РадиоСофт»
109125, Москва, ул. Саратовская, 6/2